



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI – UNIVATES

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**EFEITOS NAS PROPRIEDADES VOLUMÉTRICAS E MECÂNICAS
DEVIDO À INCORPORAÇÃO DE CAL EM PRÉ-MISTURADO A FRIO
UTILIZANDO MATERIAL FRESADO**

Felipe Gallas

Lajeado, dezembro de 2018

Felipe Gallas

**EFEITOS NAS PROPRIEDADES VOLUMÉTRICAS E MECÂNICAS
DEVIDO À INCORPORAÇÃO DE CAL EM PRÉ-MISTURADO A FRIO
UTILIZANDO MATERIAL FRESADO**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Etapa II, na linha de formação específica em Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari – Univates, como parte da exigência para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. João Rodrigo Guerreiro Mattos

Lajeado, dezembro de 2018

Felipe Gallas

**EFEITOS NAS PROPRIEDADES VOLUMÉTRICAS E MECÂNICAS
DEVIDO À INCORPORAÇÃO DE CAL EM PRÉ-MISTURADO A FRIO
UTILIZANDO MATERIAL FRESADO**

A banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Etapa II, do Curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari, como parte da exigência para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Prof. Dr. João Rodrigo Guerreiro Mattos –
orientador
Universidade do Vale do Taquari

Me. Thaís Radünz Kleinert

Me. Guilherme Ebani Jacques

Lajeado, dezembro de 2018.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, primeiramente, por me dar saúde para terminar essa incrível tarefa. Em seguida, agradeço a todos que puderam colaborar de uma maneira ou outra e na realização deste trabalho, em especial:

Aos meus pais, Decio e Celia, e à minha irmã Fernanda, pelo incentivo oferecido desde sempre para os estudos;

À minha namorada, Paula, por ter muita paciência, por me confortar e dar apoio todo apoio, especialmente durante os momentos mais importantes em que eu estava muito desgastado;

Ao meu professor orientador, João Rodrigo, que fez de tudo para que eu conseguisse me superar, me cobrando e me auxiliando, sendo uma fonte de conhecimento e de inspiração;

Também devo meus agradecimentos a todos que contribuíram com a execução dos ensaios realizados: aos laboratoristas Viane, Guilherme, Laura e Marcelo, do LATEC da UNIVATES; ao Fernando, do GEPPASV da UFSM; à doutoranda Natália Mensch e aos bolsistas Débora, Eduarda, Douglas e Anna, do PETER/LAPAV da UFRGS.

Devo aos membros da banca e à coordenação do curso agradecimentos pela compreensão e adiamentos das datas, pelos empecilhos, e também por possíveis apontamentos.

RESUMO

Sabe-se que, devido à atual situação econômica do Brasil, os investimentos nas recuperações rodoviárias sofreram importantes diminuições. Segundo o Boletim Estatístico (CNT, 2017), 65.332km de rodovias se encontram em estado péssimo a regular, o que representa 61,74% da malha pavimentada brasileira. Nesse cenário, uma das práticas que alia economia e sustentabilidade é a reciclagem de pavimentos asfálticos. Um possível destino para esse material é a composição de pré-misturados a frio (PMF), que podem ser empregados para vias de baixo volume de tráfego devido às suas propriedades mecânicas. Dessa maneira, esta pesquisa visa estudar o aproveitamento do fresado asfáltico da rodovia ERS-421, trecho localizado no município de Lajeado-RS, como agregado graúdo utilizado na dosagem de um PMF com emulsão de cura média RM-1C, esta será a mistura de referência. Além disso, verificar-se-á o efeito nas propriedades volumétricas e mecânicas da incorporação de cal nos teores de 1% e 2%. Para obtenção de teor de projeto de cada mistura, foram estudados os parâmetros volumétricos, como densidade aparente, densidade máxima teórica e volume de vazios. A estabilidade e fluência Marshall foi realizada para a caracterização mecânica de cada mistura. Com estes resultados, utilizando a média aritmética dos teores que obtiveram melhor desempenho nos parâmetros dos ensaios acima citados, chegou-se a um teor de projeto de 5,70% para a mistura sem adição de cal, 7,33% para a mistura com 1% de cal adicionado e 8,30% para a mistura com 2% de cal. Por fim, com a determinação dos teores de projeto para cada mistura, foram moldados corpos de prova para a caracterização mecânica, utilizando os ensaios de resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência e de deformação permanente pelo *creep* estático, dos quais percebeu-se que a mistura com 2% de cal apresentou os melhores resultados quanto a módulo de resiliência 1842,8 MPa e quanto sua resistência à tração no valor de 0,24 MPa. A mistura sem cal apresentou os piores resultados nesses quesitos 1170,8 MPa para módulo de resiliência e 0,21 MPa para resistência à tração. As misturas na temperatura de 25°C apresentaram valores menores de deformação, se comparados com as misturas na temperatura de 40°C, elas também deformam mais lentamente até a estabilização, diferentemente das misturas a 40°C que tem uma deformação inicial mais rápida até estabilizar. A dosagem sem cal apresenta a menor deformação com 25°C no valor de 0,051cm²/kgf e a maior com a temperatura de 40°C sendo 0,1056cm²/kgf. Conclui-se com estes resultados, que o emprego de material fresado como agregado para pré-misturados a frio é totalmente viável para vias de pouco tráfego e que ao se adicionar cal hidratada aumenta-se a qualidade dos parâmetros analisados.

Palavras-chave: Pré-misturado a frio. Agregado fresado. Incorporação de cal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Reciclagem a quente em usinas gravimétricas e volumétricas	17
Figura 2 – Sistema de reciclagem a quente in situ, com fresagem a quente	18
Figura 3 – Localização da ERS-421 (Avenida Pedro Teobaldo Breidenbach)	26
Figura 4 – Material fresado	28
Figura 5 – Quarteamento do fresado	29
Figura 6 – Procedimento para determinação da massa específica do agregado graúdo.....	31
Figura 7 – Procedimento para determinação da massa específica real do agregado miúdo.....	32
Figura 8 – Rotarex	33
Figura 9 – Procedimento para determinação do equivalente de areia	35
Figura 10 – Ensaio de determinação da finura da cal.....	36
Figura 11 – Mediando as marcações	37
Figura 12 – Marshall	40
Figura 13 – Estabilidade e fluência	42
Figura 14 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	43
Figura 15 – Equipamento de compressão durante ensaio de <i>creep</i> estático.....	44
Figura 16 – Esquemático e equipamento	45

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Granulometria dos materiais utilizados para compor o PMF	30
Gráfico 2 – Função fluência de uma amostra do ensaio de <i>creep</i>	45
Gráfico 3 – Curvas granulométricas das misturas	49
Gráfico 4 – Comparação entre a relação da densidade aparente x teor de emulsão	51
Gráfico 5 – Comparativo da relação do volume de vazios x teor de emulsão	52
Gráfico 6 – Comparativo da relação da estabilidade x teor de emulsão	54
Gráfico 7 – Comparativo da fluência x teor de emulsão	55
Gráfico 8 – Teor de emulsão em função do teor de cal	57
Gráfico 9 – Densidades aparentes em função do teor de cal utilizado	58
Gráfico 10 – Comparativo do volume de vazios com o teor de cal utilizado.....	58
Gráfico 11 – Resistência à tração em função do teor de cal utilizado em cada mistura.....	60
Gráfico 12 – Tempo x Deformação para a temperatura de 25°C	61
Gráfico 13 – Tempo x Deformação para a temperatura de 40°C	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Granulometria do material de enchimento	21
Tabela 2 – Composição do PMF – Tolerâncias.....	22
Tabela 3 – Condições de Vazios/Estabilidade e Fluência	23
Tabela 4 – Resultados de outros autores	24
Tabela 5 – Granulometria do CBUQ utilizado no revestimento da ERS/421	26
Tabela 6 – Densidades da mistura	27
Tabela 7 – Características RM-1C	27
Tabela 8 – Granulometria do material agregado utilizado	36
Tabela 9 – Características dos agregados coletados	38
Tabela 10 – Faixa A.....	47
Tabela 11 – Mistura 1	48
Tabela 12 – Mistura 2	48
Tabela 13 – Mistura 3	49
Tabela 14 – Teores preliminares	50
Tabela 15 – Densidades aparentes.....	50
Tabela 16 – Densidades máximas teóricas	51
Tabela 17 – Volume de Vazios	52
Tabela 18 – Estabilidade e Fluência Marshall para os 5 teores de emulsão da mistura 1	53
Tabela 19 – Estabilidade e Fluência Marshall para os 5 teores de emulsão da mistura 2	53
Tabela 20 – Estabilidade e Fluência Marshall para os 5 teores de emulsão da mistura 3	54
Tabela 21 – Parâmetros para escolha do teor de projeto	55
Tabela 22 – Comparações.....	56
Tabela 23 – Resultados volumétricos da mistura com teor de projeto	57
Tabela 24 – Resistência à tração.....	59
Tabela 25 – Módulo de resiliência	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAP	Cimento asfáltico de petróleo
CBR	<i>Califórnia Bearing Ratio</i>
CBUQ	Concreto betuminoso usinado a quente
CH-I	Cal calcítica
CPs	Corpos de prova
CNT	Confederação Nacional de Transporte
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DAER	Departamento Autônomo de Estradas e Rodagens
EAP	Emulsão Asfáltica de Petróleo
Gmm	Densidade Máxima Teórica
HIR	<i>Hot In-place Recycling</i>
LAPAV	Laboratório de Pavimentação
MR	Módulo de resiliência
PMF	Pré-Misturado a Frio
RAP	<i>Recycled Asphalt Pavement</i>
RS	Rio Grande do Sul
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Objetivos.....	13
1.1.1 Objetivo geral	13
1.1.2 Objetivos específicos	13
1.2 Justificativa e relevância da pesquisa	14
1.3 Estrutura do trabalho	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 Reciclagem do pavimento asfáltico.....	15
2.2 Tipos de reciclagem do pavimento asfáltico	16
2.2.1 Reciclagem a quente	16
2.2.2 Reciclagem a frio.....	18
2.3 Fresagem.....	19
2.3.1 Tipos de fresagem.....	19
2.4 Pré-misturado a frio	20
2.4.1 Materiais que compõe o pré-misturado a frio.....	20
2.4.2 Composição do pré-misturado a frio	22
2.4.3 Dosagem do pré-misturado a frio	23
2.5 Resultados obtidos de outros autores	23
3 MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1 Materiais.....	25
3.1.1 Fresado.....	25
3.1.2 Pó de pedra	27
3.1.3 Emulsão asfáltica	27
3.1.4 Cal.....	27
3.2 Métodos	28
3.2.1 Granulometria dos materiais.....	28
3.2.2 Determinação da massa específica real, massa específica aparente e absorção do agregado graúdo	30
3.2.3 Determinação da massa específica real do agregado miúdo utilizando picnômetro	32
3.2.4 Teor de ligante do fresado	33
3.2.5 Equivalente de areia.....	34
3.2.6 Finura da cal hidratada	35
3.2.7 Determinação da massa específica real da cal hidratada	36
3.2.8 Cálculo do Teor Preliminar de Emulsão Asfáltica	38

3.2.9 Dosagem Marshall	39
3.2.10 Densidade aparente	40
3.2.11 Densidade máxima teórica	41
3.2.12 Determinação do volume de vazios	41
3.2.13 Estabilidade e fluência Marshall	42
3.2.14 Resistência à tração por compressão diametral	42
3.2.15 Deformação permanente	43
3.2.16 Módulo de resiliência.....	45
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	47
4.1 Ajuste granulométrico	47
4.2 Teor preliminar.....	50
4.3 Resultados volumétricos.....	50
4.4 Resultados dos ensaios mecânicos das misturas	52
4.5 Escolha do teor de emulsão de projeto	55
4.6 Resultados Volumétricos da mistura com teor de projeto.....	56
4.7 Resultados mecânicos da mistura com teor de projeto.....	59
4.7.1 Resistencia à tração	59
4.7.2 Deformação permanente.....	60
4.7.3 Modulo de resiliência	62
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	64
REFERÊNCIAS	66
ANEXO A – Certificado com as características do RM – 1C BETUNEL	71
APÊNDICE A – Projeto de Pré misturado a frio	72
APÊNDICE B – Relatório de ensaio de deformação permanente	87

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, os projetos de pavimentação rodoviária possuem, em média, de 10 a 15 anos de vida útil, e durante a obra são utilizadas grandes quantidades de agregados naturais, gerando resíduos e provocando impactos para a natureza. Os processos para a recuperação e restauração também utilizam estas mesmas fontes pétreas e a reciclagem dos materiais é um aliado nesta preocupação ambiental (SPECHT et al., 2013).

Segundo a Confederação Nacional de Transporte (CNT, 2017), o Brasil necessita recuperar a sua situação econômica, fazendo com que a demanda por maior eficiência e qualidade das rodovias do país aumente. Expandir a infraestrutura pode ser a opção mais rápida e segura para alcançar o desenvolvimento e também gerar empregos para a população brasileira. Lopes (2016) comenta que os investimentos em infraestrutura trazem novos canais de produção econômica estimulando a competitividade entre os setores, desenvolvendo a região. Investimentos em infraestrutura trazem mudanças na produtividade, trazendo aumentos dos lucros aliado a inovações tecnológicas.

De acordo o Boletim Estatístico (CNT, 2017), o modal rodoviário apresenta 61,1% de participação no transporte de cargas no Brasil, influenciando diretamente na economia do país, pois é através deste que é feito o deslocamento de alimentos, insumos, combustíveis e matéria-prima para a população e empresas no país. Com a paralisação dos caminhoneiros que aconteceu recentemente no país foi possível verificar a importância que o transporte de carga rodoviário apresenta para a população e para o desenvolvimento do país. Mesmo esse modal sendo tão importante, do total de 105.814 km de rodovias pavimentadas no Brasil, 65.332km

encontram-se em estados de regular a péssimo, número este que representa 61,74% do total da malha viária.

Conforme Fonseca et al. (2014, apud MOLZ, 2017), a realidade das vias brasileiras é de preocupação, pois mesmo estando em constante recuperação, continuam deterioradas. As que estão em manutenção geram uma grande quantidade de resíduos fresados do pavimento e esse material nem sempre tem a destinação mais adequada. A reciclagem de pavimentos é um ótimo destino para os detritos, não somente pela capacidade ambiental que se encontra para os resíduos, mas também pela sua rapidez de execução e o baixo custo final da obra (SILVA, 2012).

De acordo com Barros (2013), o material que resulta da fresagem é composto por agregado graúdo, miúdo e cimento asfáltico oxidado. Esse material tem boa qualidade para revestimentos reciclados, aterros, reforços de subleito, camadas de base, entre outros. Em diversos países, a técnica de utilizar fresado para revestimentos reciclados já é utilizada com maior frequência.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem como objetivo geral avaliar procedimento de dosagem de um pré-misturado a frio (PMF) utilizando *Recycled Asphalt Pavement* (RAP) e os efeitos nas suas propriedades mecânicas devido à incorporação de cal.

1.1.2 Objetivos específicos

O estudo tem como objetivos específicos:

- a) caracterizar o material fresado;
- b) determinar o teor de betume de misturas de PMF utilizando material fresado a partir da dosagem Marshall;
- c) analisar as propriedades volumétricas das misturas de PMF dosado com RAP e das misturas com a incorporação de 1% e 2% de cal;
- d) analisar as propriedades mecânicas das misturas de PMF dosado com RAP e das misturas com a incorporação de 1% e 2% de cal.

1.2 Justificativa e relevância da pesquisa

A malha viária brasileira apresenta diversos trechos pavimentados com defeitos, provenientes das ações climáticas e do tráfego elevado, agravados pela falta de manutenção preventiva. Para realizar os reparos necessários, o investimento a ser feito é alto. Por esse motivo, buscam-se soluções para diminuir o custo dos reparos e manter a eficiência e finalidade do pavimento. Uma das possíveis soluções que podem ser empregadas é a reciclagem do pavimento, pois permite reaproveitar os materiais existentes para a construção de novas camadas, sendo uma alternativa viável técnica e economicamente, além de contribuir para a diminuição dos impactos ambientais.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho é composto de cinco capítulos, sendo que o primeiro aborda a introdução, os objetivos da pesquisa, as limitações, justificativa e importância.

O Capítulo 2 discorre sobre o referencial teórico, onde são abordados assuntos relacionados ao pavimento asfáltico, tipos de reciclagem, tipos de fresagem, composição e dosagem do pré-misturado a frio e resultados de pesquisas feitas por outros autores.

O Capítulo 3 apresenta os materiais e métodos da pesquisa utilizados no estudo, dando ênfase para a caracterização do material fresado e para os ensaios realizados. O quarto capítulo, por sua vez, traz os resultados encontrados e as análises dos mesmos, que resultam nas conclusões da pesquisa, apresentadas no quinto capítulo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Reciclagem do pavimento asfáltico

A reciclagem dos pavimentos iniciou-se na década de 1970, em função da crise econômica internacional. Essa crise gerou uma diminuição da oferta de materiais asfálticos, que obrigou a serem trabalhadas novas técnicas para o reaproveitamento dos resíduos oriundos de pistas deterioradas. No período dos anos 1980 iniciou-se a fresagem de pavimento no Brasil, na rodovia Anchieta, na cidade de São Paulo, utilizando uma máquina fresadora americana e reciclagem a frio (BONFIM, 2007).

A reciclagem de pavimentos asfálticos consiste em se reutilizar a capa de rolamento e a camada da base, fresando-as e combinando com aditivos rejuvenescedores e/ou ligantes asfálticos, espumas e emulsões asfálticas. Cal e cimento Portland também podem ser utilizadas para se melhorar alguma característica específica. Podem também ser incorporados agregados para que se corrija a granulometria. A reciclagem é feita através da reutilização parcial ou total dos materiais das camadas do pavimento. Depois da desagregação, os materiais são misturados ou tratados por energia térmica (BERNUCCI et al., 2008).

Segundo Kandhal e Mallick (1998, apud CERENTINI, 2016), existe a necessidade de restaurar os pavimentos para mantê-los em boas condições. Os principais motivos para a restauração são: qualidade do pavimento de rolagem inadequado, excesso de patologias no pavimento, atrito ruim da capa de rolamento, grande necessidade de manutenção, danos excessivos aos usuários e capacidade estrutural insuficiente para o tráfego projetado.

2.2 Tipos de reciclagem do pavimento asfáltico

Existem várias técnicas de reciclagem de pavimentos, sendo que as mais utilizadas são reciclagem a quente e reciclagem a frio. As etapas de reciclagem consistem em primeiramente fresar o pavimento, na profundidade especificada em projeto, e em seguida transportar o material fresado até uma usina (reciclagem em usina) ou realizar reciclagem no próprio local (reciclagem *in situ*) (DNER-ME 035, 1998).

2.2.1 Reciclagem a quente

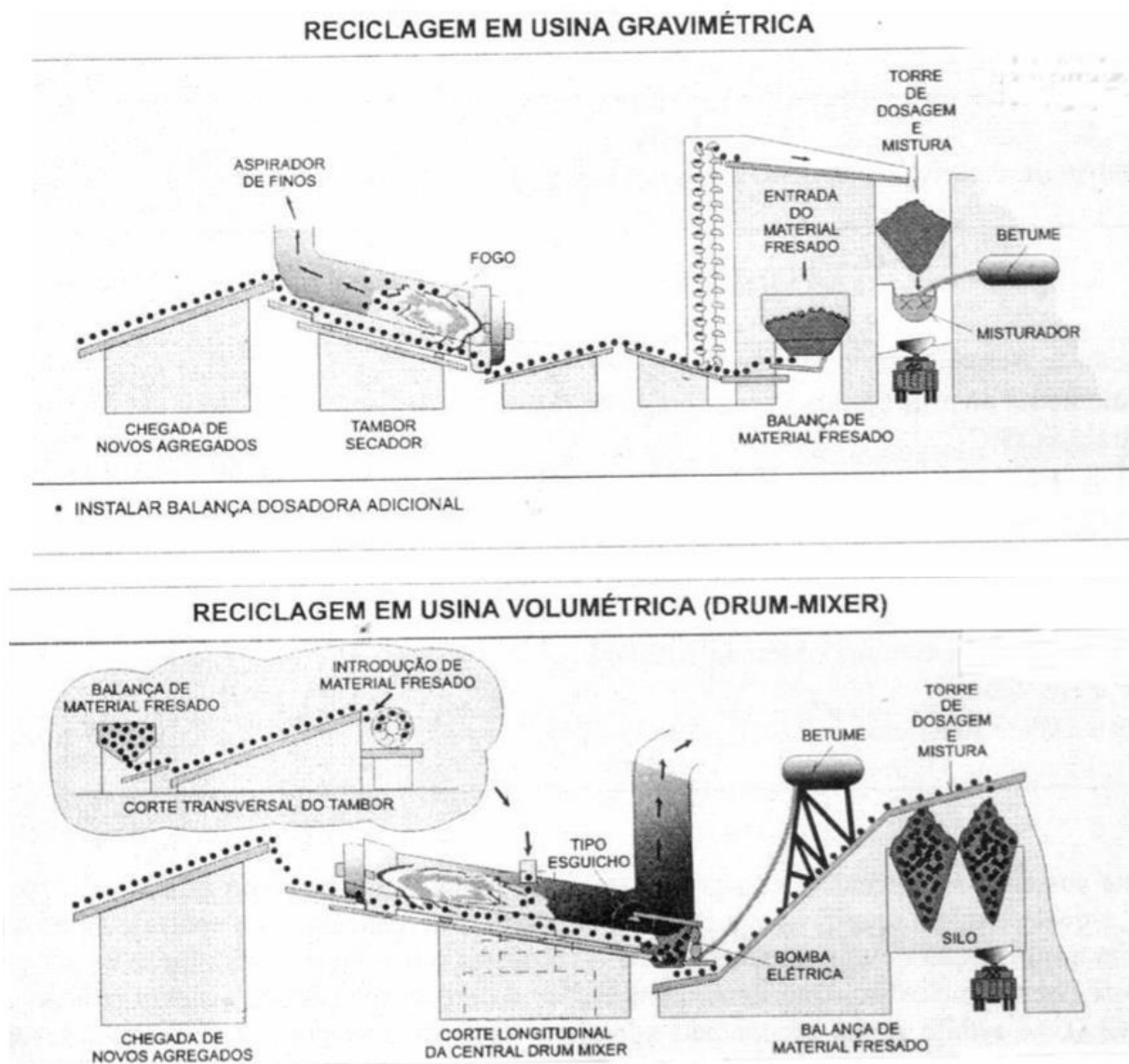
De acordo com Kandhak e Mallick (1998, apud CERENTINI, 2016), a reciclagem a quente consiste em retirar parcial ou totalmente o revestimento asfáltico e reduzi-lo a dimensões apropriadas, após fazer a mistura a quente do material removido com o agregado virgem. Esse tipo de reciclagem pode ser realizado em usina ou *in situ*.

Na reciclagem a quente em usina, em conformidade com Gontijo (2012, apud BATISTA, 2016), após a fresagem do material, o mesmo é transportado até o local de usinagem para que possa ser realizada a reciclagem. Com o processo pronto, o material é levado para a pista onde deverá ser espalhado e compactado.

O material pode ser misturado em usinas gravimétricas ou volumétricas, como mostra a Figura 1. Na parte superior, observa-se a usina gravimétrica — nela o material virgem é transportado pela esteira, passando pelo fogo e a seguir o material fresado devidamente pesado é incluído; ao final, ambos são misturados e o betume é inserido. Na parte inferior, tem-se a usina volumétrica: nela, o material fresado é inserido no tambor de secagem, seguindo para os demais processos. A reciclagem a quente realizada em usinas gravimétricas permite que 50% do material fresado faça parte da composição (RAMOS et al., 1996). Já na usina volumétrica (*Drum Mixer*), pode-se ter aproveitamento de 30 a 50% do material.

Segundo Castro (2003, apud BATISTA, 2016), realizar a reciclagem a quente em usina permite corrigir misturas deficientes e contribui com o meio ambiente, pois o material reutilizado seria descartado, causando prejuízos ambientais.

Figura 1 – Reciclagem a quente em usinas gravimétricas e volumétricas



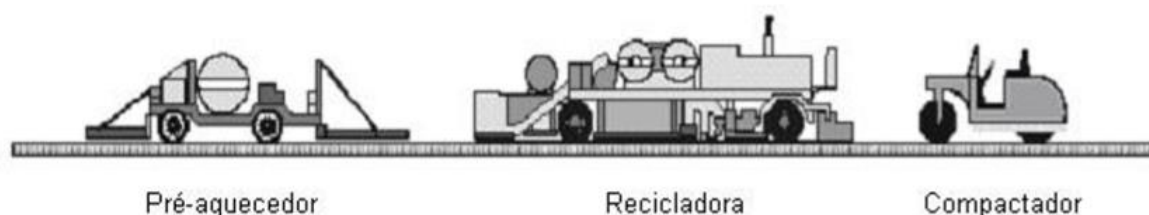
Fonte: Gontijo (2012, apud BATISTA, 2016, p. 26).

Já a reciclagem a quente *in situ* consiste em fresar o revestimento asfáltico e no próprio local, utilizar ligante novo e/ou agente rejuvenescedor e/ou agente de reciclagem, agregado e/ou mistura asfáltica. O material reciclado é misturado e após isso o é distribuído e compactado de forma convencional (DAVID, 2006).

Na bibliografia internacional, este processo é chamado de *Hot In-place Recycling* (HIR) e o processo se dá a partir do aumento da temperatura do pavimento a fim de alterar sua viscosidade. Logo após a temperatura ficar apropriada, ele é submetido ao processo de remoção por fresagem.

Castro (2003, apud BATISTA, 2016) afirma que para realizar a reciclagem a quente *in situ* é utilizado um equipamento com um método complexo, o qual é composto por duas unidades, sendo a primeira a pré-aquecedora e a segunda uma usina de reciclagem *in situ*. Os raios infravermelhos emitidos pelas placas do pré-aquecedor realizam o pré-aquecimento do revestimento asfáltico até uma temperatura de 130°C, como mostra a Figura 2.

Figura 2 – Sistema de reciclagem a quente *in situ*, com fresagem a quente



Fonte: PINTO (2007, apud BATISTA, 2016, p. 27).

2.2.2 Reciclagem a frio

A reciclagem a frio é assim denominada devido ao fato de não utilizar energia para aquecer os materiais durante o processo. O material fresado é misturado com materiais betuminosos, agregados, agentes rejuvenescedores ou estabilizantes químicos. Após isso, é feito o revestimento a partir da mistura reciclada usada como tratamento superficial ou como uma mistura asfáltica nova a quente (MOMM; DOMINGUES, 2007 apud BATISTA, 2006).

Este tipo de reciclagem, na maioria das vezes, é utilizado para restauração estrutural da base do pavimento. Conforme o DNIT (2006), nas vias com volume de tráfego baixo, acostamentos deteriorados, vias principais, a reciclagem a frio tem um bom desempenho.

A reciclagem a frio se divide em reciclagem a frio *in situ* e reciclagem a frio em usina, a seguir descritas. Na reciclagem a frio em usina, o material fresado é transportado para uma usina onde deverá ocorrer o procedimento. O processo ocorre em usina estacionária, sem calor e consiste em misturar o material fresado com ligante novo e/ou agente de reciclagem, gerando o material que será usado como base (CERENTINI, 2016).

Na reciclagem a frio *in situ*, a mistura dos materiais é feita sem aplicar calor e a reutilização é feita no próprio local. De acordo com Kandhal e Mallick (1998, apud CERENTINI, 2016), o processo de reciclagem a frio *in situ* pode ser feito em grande profundidade ou profundidade parcial. O processo de reciclagem profunda consiste em triturar as camadas de revestimento asfáltico, base e até a sub-base, misturá-las com ligante e depositá-

las como base estabilizada do pavimento. Na reciclagem de profundidade parcial, são removidos em torno de 50 a 100mm do revestimento asfáltico e o mesmo é misturado com ligante novo, para reutilizar como base do pavimento, num tráfego de pequeno a médio porte.

2.3 Fresagem

A fresagem é o desbastamento a quente ou a frio da superfície asfáltica, que faz parte do processo de reciclagem de pavimento asfáltico. Dois tipos específicos de processos e equipamentos existem para a fresagem: o desbaste por abrasão feito a frio e o processo a quente, que se realiza fazendo o pré-aquecimento da estrutura para que o desbaste fique facilitado (BARROS, 2013).

2.3.1 Tipos de fresagem

A fresagem de pavimento pode ser classificada quanto à sua espessura de corte — podendo ser superficial, rasa ou profunda — e quanto à rugosidade resultante da pista (padrão, fina e microfresagem). Segundo o autor BONFIM, 2007, temos:

- a) **Fresagem superficial:** tem como objetivo corrigir os defeitos existentes na superfície do pavimento, dispensando o posterior recapeamento da pista. Este procedimento pode ser utilizado para reparos de defeitos como exsudação e as deformações plásticas.
- b) **Fresagem rasa:** este tipo de procedimento é executado nas camadas superiores do pavimento; em alguns casos, no entanto, pode chegar até a camada de ligação. Em média, esse processo tem 5 cm de corte, sendo utilizado para corrigir defeitos funcionais e remendos superficiais.
- c) **Fresagem profunda:** este procedimento pode ir além da camada de capa, chegando nas camadas de ligação, de base e até da sub-base do pavimento. Esta técnica normalmente é utilizada em pavimentos que precisam de reparos estruturais e também em serviços com porte pequeno, como, por exemplo, o reenquadramento de buracos.
- d) **Fresagem padrão:** é a fresagem resultante de um cilindro oferecido nos equipamentos. A distância lateral entre os dentes de corte do cilindro fresador é de

aproximadamente 15 mm. Essa técnica de fresagem é utilizada normalmente em locais que necessitam de uma nova camada de revestimento.

- e) **Fresagem fina:** os cilindros que fresam têm distância lateral entre cada dente de 8 mm. Este tipo de fresagem é utilizado na regularização das vias, por melhorar as condições de trafegabilidade dos usuários.
- f) **Microfresagem:** possui o cilindro dotado com dentes de corte, posicionados a uma distância de 2 a 3 mm laterais, sua aplicação remove uma camada sutil do revestimento, e essa técnica deve ser utilizada na retirada de faixas horizontais de sinalização da pista. Esta técnica de fresagem dispensa a camada de revestimento posterior, quando utilizada de maneira correta do perfil longitudinal da via.

2.4 Pré-misturado a frio

Em conformidade com a Norma DNIT-ES 153 (DNIT, 2010. p. 3):

O pré-misturado a frio com emulsão asfáltica convencional é definido como uma mistura executada à temperatura ambiente, utilizando uma usina de acordo. O PMF é composto de agregado mineral graduado, material de enchimento (*filler*) e emulsão asfáltica que comprime e espalha entre o material.

2.4.1 Materiais que compõe o pré-misturado a frio

O pré-misturado a frio é composto por agregado mineral, material de enchimento e a emulsão asfáltica, descrito a seguir (DNIT-ES 153, 2010). Temos os materiais que constituem detalhados abaixo.

2.4.1.1 Agregado graúdo

O agregado graúdo deve ser composto por fragmentos duráveis, são, livres de substâncias nocivas e de torrões de argila, podendo ser composto por pedra ou seixo, britados ou algum outro material que for especificado em projeto. A caracterização do agregado graúdo deve estar de acordo com os seguintes itens (DNIT, 2010):

- a) desgaste Los Angeles igual ou inferior a 40%, admite-se agregados com valores maiores, tendo desempenho satisfatório no emprego anterior, segundo DNER-ME 035 (DNER, 1998);
- b) índice de forma superior a 0,5, conforme DNER-ME 086 (DNER, 1994);

- c) durabilidade, perda inferior a 12%;
- d) granulometria dos agregados (DNER, 1998);
- e) adesividade superior a 90% (DNER, 1994).

2.4.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo deve possuir partículas individuais com resistência adequada. Devem apresentar angulosidade moderada, livres de materiais argilosos, de materiais nocivos e o equivalente de areia deve ser igual ou superior a 55%.

2.4.1.3 Material para enchimento (*filler*)

O material usado para enchimento deve conter materiais minerais divididos de maneira muito fina e não devem ser plásticos — podendo ser cimento Portland, pó calcário e cal extinta — e deve conter a granulometria mostrada na Tabela 1, quando ensaiados pelo método DNER-ME 083 (DNER, 1998). O material ao ser aplicado deve estar seco e isento de grumo.

Tabela 1 – Granulometria do material de enchimento

Peneiras n.º	Mm	% mínima passando
40	0,42	100
80	0,175	95
200	0,075	65

Fonte: DNIT-ES 153 (DNIT, 2010, p. 4).

2.4.1.4 Cal hidratada em misturas asfálticas

A cal vem sendo utilizada há muito tempo em misturas asfálticas. Entre os anos de 1910 e 1930, foram realizados estudos nos Estados Unidos a fim de melhorar a capa asfáltica com adição de 1% a 2% de cal hidratada nos resultados mais significativos, tanto em asfalto quente, quanto no frio, aumentando a adesividade e diminuindo o volume de vazios. (GUIMARÃES, 2002)

De acordo com Bock (2012), quando utilizada a cal hidratada, inúmeros benefícios para o concreto asfáltico podem ser comprovados, como: prevenir danos causados por umidade, reduzindo o envelhecimento do ligante e melhorando o comportamento quanto a trincamento por fadiga e deformação permanente.

Segundo Ishai e Craus (1977, apud DARTORA, 2015), a cal hidratada melhora as propriedades superficiais e a rugosidade que adere o agregado ao ligante. As propriedades químicas também são influenciadas mudando as ligações dos ácidos do ligante, aumentando a adesividade de toda a mistura.

Existem várias maneiras de incorporar-se a cal nas misturas asfálticas. Ela pode ser adicionada em forma de *filler* ou de calda ao agregado graúdo, podendo também estar seco ou úmido, (BOCK, 2012).

2.4.1.5 Emulsão Asfáltica de Petróleo (EAP)

A Emulsão Asfáltica de Petróleo (EAP) é um material de cor castanha e com a temperatura ambiente apresenta baixa viscosidade. Consiste em uma mistura homogênea de asfalto, água e agente emulsificante. Além desses materiais, podem compor a mistura solventes e outros aditivos especiais (BERNUCCI et al., 2008).

2.4.2 Composição do pré-misturado a frio

Conforme DNIT-ES 153 (DNIT, 2010), a composição do pré-misturado a frio deve estar de acordo com a Tabela 2. Ela determina as tolerâncias de projeto para cada faixa.

Tabela 2 – Composição do PMF – Tolerâncias

Peneiras		% mínima passando				Tolerâncias da faixa de projeto
Malha	Mm	A	B	C	D	
1''	25,4	100	-	100	-	± 7%
3/4"	19,1	75-100	100	95-100	100	± 7%
1/2"	12,7	-	75-100	-	95-100	± 7%
3/8''	9,5	30-60	35-70	40-70	45-80	± 7%
Nº 4	4,8	10-35	15-40	20-40	25-45	± 5%
Nº 10	2,0	5-20	10-25	10-25	15-30	± 5%
Nº 200	0,075	0-5	0-5	0-8	0-8	± 2%
Teor de Betume Solúvel no CS2 %		4-6	4-6	4-6	4-6	± 2%

Fonte: DNIT-ES 153 (DNIT, 2010, p. 4).

É visto na Tabela 2, que a faixa a ser usada é aquela onde o diâmetro máximo é igual ou inferior a 2/3 da espessura da camada. Como por exemplo, se a camada de rolamento tiver 4cm de espessura, o diâmetro máximo do agregado utilizado para a composição do PMF será de 1'' e se ela for de 3 cm o maior agregado poderá ter 3/4''. O percentual de asfalto da mistura, deve ficar entre 4 e 6% em todas as faixas.

Para verificar as condições de vazios, estabilidade e fluência das misturas a frio deve ser usado o Método Marshall modificado, DNER-ME 107 (DNER, 1994). Os valores descritos na Tabela 3 devem ser obedecidos.

Tabela 3 – Condições de Vazios/Estabilidade e Fluência

Porcentagem de vazios	5 a 30%
Estabilidade, mínima	250 kgf (75 golpes) 150 kgf (50 golpes)
Fluência, mm	2,0 – 4,5

Fonte: DNIT-ES 153 (DNIT, 2010, p. 4).

2.4.3 Dosagem do pré-misturado a frio

A dosagem de uma mistura asfáltica consiste na escolha, por meio de procedimentos experimentais, de um teor “ótimo” de ligante, com base em uma faixa granulométrica pré-definida. Para realizar a dosagem do pré-misturado a frio utiliza-se o método DNER-ME 107 (DNER, 1994), o qual inicia-se com o cálculo de teores preliminares de asfalto e emulsão asfáltica. Também pode ser utilizado o método que se baseia na proposição de Duriez (SANTANA, 1993), que consiste no cálculo da superfície específica dos agregados a partir da proporção dos diferentes tamanhos de partícula devidamente ponderada (BERNUCCI et al., 2008).

2.5 Resultados obtidos de outros autores

Conforme Cerentini (2016), a sua pesquisa foi realizada utilizando material fresado de pontos da BR-386. Produzindo uma mistura de pré-misturado a frio com emulsão RM-1C, obtendo resultados expressos pela Tabela 4, que podem ser usados em operações de “Tapa buraco”.

A pesquisa desenvolvida por Pereira (2015) substituiu parcialmente agregados virgens em PMF por material fresado e adição de cal calcítica CH-I. Foram realizados quatro projetos de PMF referência (PMF-TR); com adição de 1% de cal calcítica (PMF-TRC); com substituição de 70% de agregados virgens por material fresado (PMF-FR); e com substituição de 70% de agregados virgens por material fresado e adição de 1% de cal calcítica (PMF-FRC).

David (2006) desenvolveu sua pesquisa com o material fresado de vias urbanas da cidade de Porto Alegre, as misturas foram produzidas com dois tipos de ligantes: emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta RL-1C e agente de reciclagem emulsionado ARE-75, resultando em quatro misturas:

- a) Fresado+RL-1C.
- b) Fresado+ARE-75.
- c) Fresado+pó de pedra+RL-1C.
- d) Fresado+pó de pedra+ARE-75.

Tabela 4 – Resultados de outros autores

Ensaio	Autores						
	Cerentini (2016)	Pereira (2015)			David (2006)		
Origem do fresado	BR-386	BR-377			Porto Alegre		
Teor de CAP (%)	5,8	5			5,1		
Teor de Emulsão (%)	7	9	8,75	3	3	3	3
Granulometria	80% fresado e 20 % pó de pedra	70% fresado, 25% brita 1 e 5% pó de pedra			Fresado	Fresado	Fresado + Pó de pedra
Emulsão	RM-1C	RM-1C	RM-1C e Cal CH-1	RL-1C	ARE - 75	RL-1C	ARE - 75
Volume de Vazios médio (%)	7,39	10,53	12,7	24	22	22	22
Estabilidade média (kgf)	500	415,14	550	7	6,5	7,5	7,75
Fluência média (mm)	4,1734	14,24	11	2,52	2,48	2,49	2,54
Módulo de Resiliência (MPa)	967	-----	-----	3707	3870	5415	3506
Resistência à tração (MPa)	0,25	0,1315	0,157	0,375	0,32	0,35	0,275
Viabilidade de uso	Vias de pouco tráfego, "tapa buraco"	-----	-----	Camadas de base	Camadas de base	Camadas de base	Camadas de base

Fonte: Do autor.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, apresentam-se os materiais e métodos envolvidos para atingir os objetivos da pesquisa. A metodologia da pesquisa aplicada neste trabalho é do tipo experimental e quantitativa, visto que serão realizados ensaios de laboratório para obtenção dos resultados.

3.1 Materiais

Neste subitem são apresentados os materiais utilizados no desenvolvimento desta pesquisa. O destaque principal é o material fresado do revestimento asfáltico e a emulsão asfáltica. Os demais materiais são o pó de pedra, a brita 1 e a cal hidratada.

3.1.1 Fresado

Para a realização do estudo foi utilizado o material fresado do revestimento asfáltico (RAP) proveniente da ERS-421 sendo que na cidade de Lajeado recebe a denominação de Avenida Pedro Teobaldo Breidenbach. O trecho da retirada do material fica entre as cidades de Lajeado (RS) e Forquetinha (RS), da estaca km 1+000 a km 5+000, como mostra a Figura 3, destacado em vermelho.

Figura 3 – Localização do trecho em que foi retirado o material fresado da ERS-421 (Avenida Pedro Teobaldo Breidenbach)



Fonte: Google Maps (2018, texto digital).

O projeto do pavimento da rodovia em questão foi executado em agosto de 1997 e a estrutura realizada foi de 4 cm de CAUQ, base de brita graduada executada com seixo britado com espessura de 17 cm, sub-base de brita graduada executada com seixo britado com espessura de 17,5 cm. Para o revestimento asfáltico de CAUQ adotou-se a faixa granulométrica tipo B, o DAER-ESP 16 (DAER, 1991). Sendo a sua composição granulométrica de 30% de brita 3/4", 32% de brita 3/8", 30% de pó de pedra e 8% de areia fina, cuja a granulometria está expressa na Tabela 5.

Tabela 5 – Granulometria do CBUQ utilizado no revestimento da ERS/421

PENEIRAS	Mistura	Faixa B do DAER	Faixa de trabalho
3/4"	100	100	100
1/2"	88,3	80.0 100.0	82,3 94,3
3/8"	79,6	70.0 90.0	73,6 85,6
n.º 4	54,0	50.0 70.0	50,0 58,0
n.º 8	41,0	35.0 50.0	37,0 45,0
n.º 30	23,5	18.0 29.0	19,5 27,5
n.º 50	15,6	13.0 23.0	13,0 19,6
n.º 100	8,8	8.0 16.0	8,0 11,8
n.º 200	6,3	4.0 10.0	4,3 8,3

Fonte: Adaptado pelo autor com base Projeto de Concreto Asfáltico ERS/421 (2018).

A porcentagem ótima de asfalto de acordo com o projeto original da rodovia, foi obtida considerando-se, o módulo de resiliência da mistura, o teor correspondente ao índice de vazios de 3,5% e demais parâmetros avaliados não descritos. Isso resultou em 6,7% a porcentagem de CAP 20 para a densidade de 97% de projeto. O equivalente de areia dos materiais empregados na composição foi de 70% e massas específicas são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Densidades da mistura

	Densidade real	Densidade aparente
Mistura	2,687 kg/dm ³	2,567 kg/dm ³
	TOTAL	2,627 kg/dm ³

Fonte: Do autor.

3.1.2 Pó de pedra

A utilização do pó de pedra é indispensável para a estabilização granulométrica do fresado, pois na sua composição faltam finos. Neste trabalho, foi adicionado pó de pedra oriundo de rocha basáltica situada na cidade de Forquetinha, no Estado do Rio Grande do Sul, para compor as misturas asfálticas estudadas.

3.1.3 Emulsão asfáltica

A emulsão asfáltica utilizada na mistura é a RM-1C, sendo recomendada para pré-misturados a frio com poucos finos e pouco ou nenhum *filler*. Esta emulsão tem ruptura média e baixa consistência, sua viscosidade fica entre 20 e 200 S e contém 62% de cimento asfáltico.

Este material foi fornecido pela empresa Betunel, a sua ficha técnica é apresentada na Tabela 7. A ficha completa fornecida pela Betunel pode ser vista no Anexo A.

Tabela 7 – Características RM-1C

Características	Limites	Encontrado
Viscosidade	20 a 200	80
Resíduo por evaporação (%)	62 min.	62,8
Peneiramento (%)	0,1 máx.	1
Sedimentação (%)	5 máx.	1,4
Carga de Partícula	Positiva	Positiva
Desemulsibilidade (%)	50 máx.	21

Fonte: Betunel adaptado pelo autor, 2018.

3.1.4 Cal

Incorpora-se a cal hidratada para suprir a falta de finos passantes na peneira de número 200 da mistura. Ela também pode ajudar na adesividade do pré-misturado a frio. A cal dolomítica utilizada é da marca Dagoberto Barcellos e é do tipo CH-II.

3.2 Métodos

3.2.1 Granulometria dos materiais

O material fresado foi recolhido diretamente da pista da rodovia ERS-421, no município de Lajeado-RS, no mês de abril de 2018. Na Figura 4 pode-se ver a granulometria deste material.

Figura 4 – Material fresado utilizado nesse estudo



Fonte: Do autor.

Para a caracterização do material fresado, realizou-se a análise granulométrica através do peneiramento. O ensaio foi realizado em conformidade com a norma DNER-ME 083 (DNER, 1998).

As amostras de fresado coletadas da rodovia foram colocadas na estufa por 24 horas, a uma temperatura de 50°C, para não alterar as características do ligante. Passado este tempo, o material foi quartado como mostra a Figura 5 e dividido em duas amostras. A amostra é pesada para se obter o peso total e a seguir o material foi peneirado pelas respectivas peneiras 1'', 3/4'', 1/2'', 3/8'', 4, 10, 200. Para a realização da granulometria da brita 1 o método é o mesmo, somente mudam-se as peneiras utilizadas para 2'', 1 1/2'', 1'', 3/4'', 1/2'', 3/8'', 1/4'', 4, 8, 10, 30, 40, 50, 80, 100, 200. Para o pó de pedra as peneiras utilizadas para o ensaio são 1/4'', 4, 8, 10, 30, 40, 50, 80, 100 e 200.

Figura 5 – Quarteamento do fresado



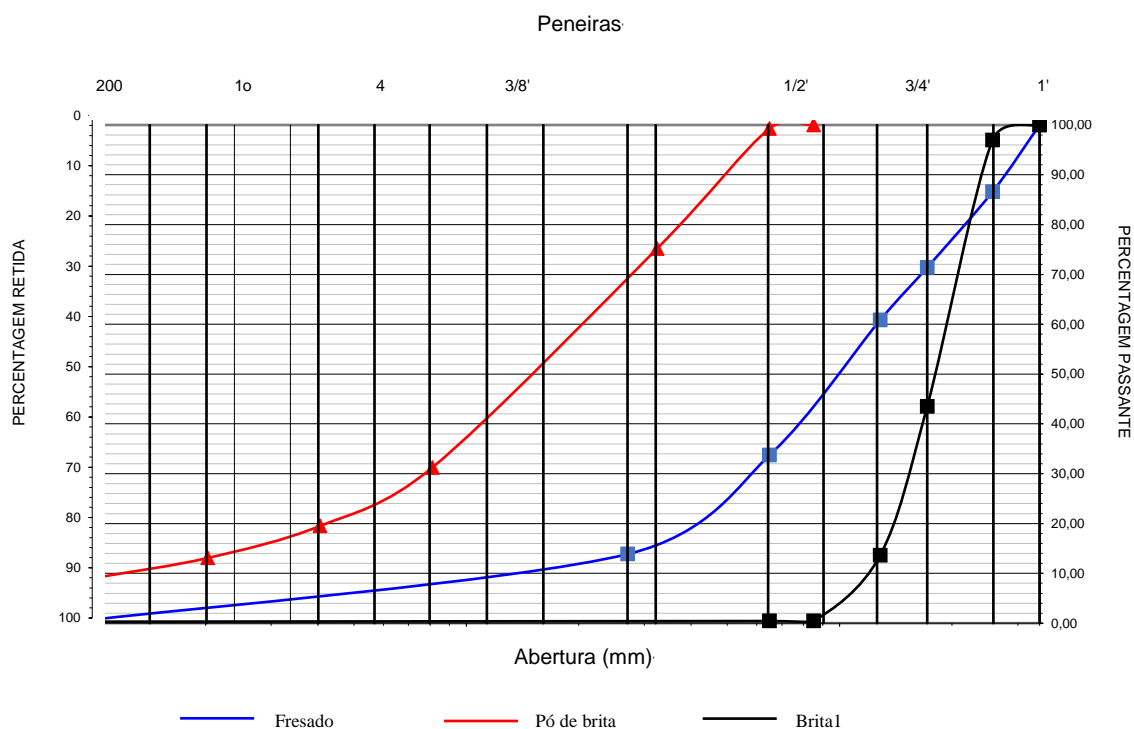
Fonte: Do autor.

O peso do material retido em cada peneira é anotado e o que sobrou no fundo também. Ao final do processo é calculado o percentual retido em cada peneira e o retido acumulado. O material passante por cada peneira é calculado com a diferença do peso total da amostra seca e o peso acumulado do material retido. Com isso, se usa a equação 1 que calcula o percentual passante da amostra total.

$$\% \text{ que passa da amostra total} = \frac{\text{Peso acumulado do material que passa}}{\text{Amostra total seca}} \times 100 \quad (1)$$

A partir dos resultados montou-se o Gráfico 1, com as granulometrias do fresado, brita 1 e pó de pedra utilizados.

Gráfico 1 – Granulometria dos materiais utilizados para compor o PMF



Fonte: Do autor.

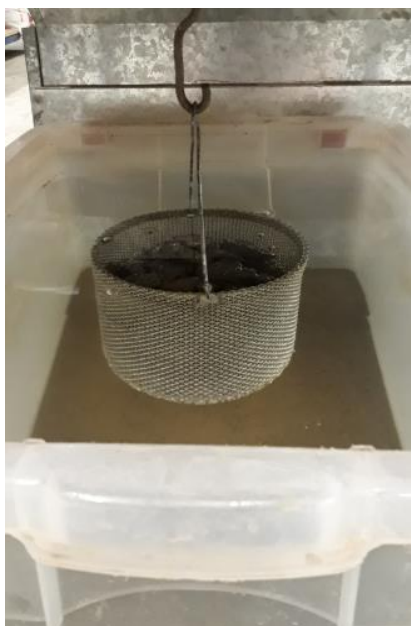
3.2.2 Massa específica real, massa específica aparente e absorção do agregado graúdo

Este procedimento é realizado conforme o DNER-ME 081 (DNER, 1998) determinando a massa específica real, massa específica aparente e a absorção do agregado que fica retido na peneira nº4 (4,76mm). Ele foi realizado para o fresado e para a brita 1.

O agregado deve ficar 24 horas submerso conforme a Figura 6a, após esse tempo ele deve ser pesado. Deve-se dar a sequência ao ensaio secando a superfície do mesmo, como mostrado na Figura 6b, e pesando-a.

Figura 6 – Procedimento para determinação da massa específica do agregado graúdo

a) Agregado imerso na água



b) Superfície do agregado sendo seca



Fonte: Do autor.

Após isto, o material é levado para a estufa para que depois de 24 horas seja pesado. A equação 2 serve para calcular a massa específica real, a equação 3 para a massa específica aparente e a equação 4 para a absorção.

$$MER = \frac{P_s}{P_s - P_i} \quad (2)$$

$$MEA = \frac{P_s}{P_h - P_i} \quad (3)$$

$$A = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

P_s = peso do agregado seco;

P_h = peso do agregado saturado com superfície seca;

P_i = peso do agregado imerso na água após 24 horas;

MER = massa específica real;

MEA = massa específica aparente;

A = Absorção.

3.2.3 Massa específica real do agregado miúdo

A massa específica é a relação entre a massa de determinada substância e o volume ocupado pela mesma. Nos agregados, tem-se a massa específica real, onde são excluídos os vazios entre os grãos e os permeáveis nos cálculos e a massa específica aparente, a qual os vazios entre os grãos e os permeáveis são considerados. Para determinar a massa específica foi utilizada DNER-ME 84 (DNER, 1995) e sua unidade de medida é expressa em kg/m³, utilizando o picnômetro com água e a amostra.

Os agregados miúdos são: areias de origem natural ou oriundas do britamento de rochas estáveis, ou ainda a mistura das duas, cujos grãos passam pela peneira 4,8mm e ficam retidos na peneira 0,075mm. Pesa-se o material, neste trabalho o pó de pedra e a parte miúda do fresado, e o picnômetro com água até a medida indicada, coloca-se o material no picnômetro com cuidado como mostrado na Figura 7a. Leva-se, então, ao agitador por 15 minutos como é visto na Figura 7b. Terminado o tempo, o picnômetro é pesado e se utiliza a equação 5 para o cálculo da massa específica real do agregado miúdo.

Figura 7 – Procedimento para determinação da massa específica real do agregado miúdo

a) Picnômetro com água



b) Picnômetro no agitador



Fonte: Do autor.

$$D = \frac{Pa}{Pp + Pa - Pao} \quad (5)$$

Onde:

Pa = peso da amostra;

P_p = peso do picnômetro com água;

P_{ao} = peso do picnômetro depois de 15 min;

D = massa específica real do agregado miúdo.

3.2.4 Teor de ligante do fresado

Para a determinação do teor de ligante do agregado fresado será realizado o ensaio no Rotarex, conforme especificações e orientações da norma 053 Misturas betuminosas – porcentagem de betume, (DNER, 1994). Primeiramente a amostra de aproximadamente 1000 g é aquecida na estufa, até chegar a uma temperatura entre 105 e 110 °C. Com essa temperatura deve-se destorroar totalmente o material com a colher, ao final pesar a amostra, o prato e dois filtros.

Colocar a amostra destorroada no prato e levá-la para o equipamento, fixa-se o prato e insere-se 200ml de solvente. O solvente deve ser deixado por 15 minutos, passado o tempo, os dois filtros são posicionados e o aparelho é ligado em baixa rotação, aumentando-a gradativamente até que a solução de betume comece a escoar. A Figura 8 mostra o rotarex com o máximo de sua rotação, 45rpm.

Figura 8 – Rotarex utilizado no ensaio



Fonte: Do autor.

Deve-se repetir o processo até que o solvente saia com a sua coloração natural, retirar o prato com cuidado e os filtros para a secagem na estufa, com temperatura entre 105 e 110 °C. Com o material seco, escovar os filtros para que os finos presos nele caiam dentro do prato e em seguida pesar o prato e os filtros. Com os dados anotados a equação 6 foi utilizada.

$$Teor\ de\ betume\ (\%) = 100 - \left(\frac{Par + (Pfn - Pfr)}{Pia} \times 100 \right) \quad (6)$$

Onde:

Pia = peso inicial da amostra;

Par = peso amostra após rotarex;

Pfn = peso dos filtros novos;

Pfr = peso dos filtros após rotarex.

3.2.5 Equivalente de areia

Para a realização deste ensaio as especificações a norma DNER – ME 054 (DNER, 1994) devem ser seguidas. Separa-se 200 g de pó de pedra, e para iniciar o ensaio é colocado defloculante até a primeira marca na proveta apropriada mostrada na Figura 9a.

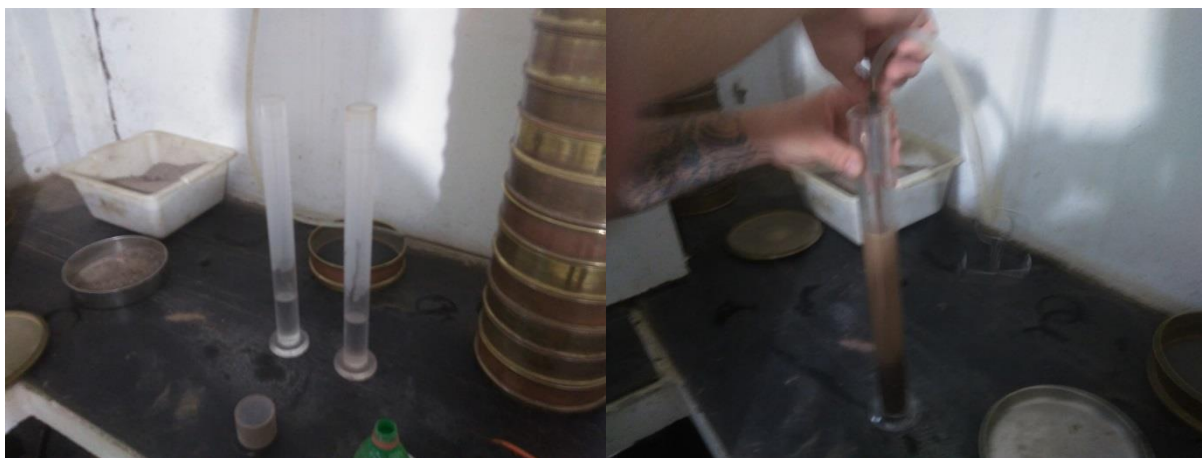
A seguir, 100 g do material pó de é introduzida por um funil, deixando o material em repouso por 10 minutos. Passados os 10 minutos do descanso, agita-se a proveta com 90 ciclos em aproximadamente 30 segundos. Insere-se o tubo lavador e com ele lava-se as paredes até que chegue a segunda marca da proveta, vista na Figura 9b.

Por mais 20 minutos é deixado em descanso, para que seja feita a próxima leitura, mostrada na Figura 9c. Mais uma proveta foi utilizada repetindo o método anterior.

Figura 9 – Procedimento para determinação do equivalente de areia

a) Defloculante até a primeira marca

b) Proveta sendo lavada



c) Medindo as marcações



Fonte: Do autor.

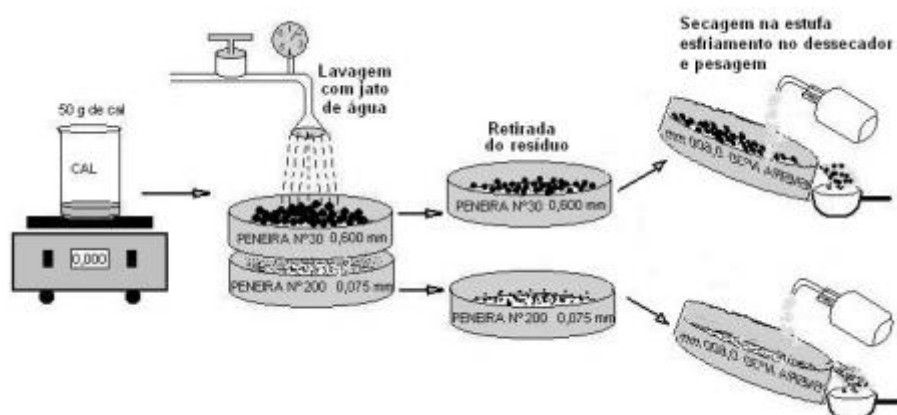
Para se obter os resultados foi utilizado a Equação (7).

$$\text{Equivalente de Areia} = \frac{\text{leitura da areia}}{\text{leitura da argila}} \times 100 \quad (7)$$

3.2.6 Finura da cal hidratada

Para a determinação da finura da cal hidratada, a norma NBR 9289 (ABNT, 2000) foi utilizada. Esse ensaio necessita de duas aberturas de peneira a de número 30 e a 200, para verificar a quantidade de material retido em cada uma. A Figura 10 ilustra o procedimento para determinação da finura.

Figura 10 – Ensaio de determinação da finura da cal



Fonte: NBR 9289, (ABNT, 2000).

Uma amostra com 50g de cal hidratada foi peneirada com lavagem de jato d'água, primeiramente na peneira de número 30 e posteriormente na de número 200. Os materiais retidos nas peneiras devem ser retirados, secados em estufa e por fim pesados. A equação 8 mostra o cálculo do percentual retido em cada peneira.

$$\text{Percentual retido} = \frac{\text{Peso material retido}}{\text{Peso amostra total}} \times 100 \quad (8)$$

A finura encontrada ficou dentro do que pede a norma para esse material, como mostra a Tabela 8.

Tabela 8 – Granulometria da cal utilizada

Peneira	Retido (%)	Máximo Permitido (%)
30	0,56	<5
200	5,12	<15

Fonte: Do autor.

3.2.7 Massa específica real da cal hidratada

O ensaio do frasco de Le Chatelier é utilizado para definir a massa específica de materiais finamente pulverizados, em conformidade com DNER-ME 085/94 (DNER, 1994). Inicia-se o ensaio, como mostra a Figura 11, inserindo querosene no frasco até que chegue a marcação entre 0 e 1 ml, enxugando as paredes acima do líquido ao final e anotando a medida.

Coloca-se a seguir uma porção da cal hidratada de aproximadamente 60g, ou até que o fluído chegue na marcação superior do frasco.

Figura 11 – Frasco utilizado para o ensaio



Fonte: Do autor.

O recipiente é tampado com sua rolha e aplica-se um movimento giratório, a fim de expulsar o ar contido no material. Um banho de água em temperatura constante deve ser feito no frasco até que a sua temperatura e a do banho não difiram. Neste momento, deve ser realizada a segunda medida, e a diferença das duas medidas será o volume líquido deslocado. A massa específica poderá ser calculada pela equação 9.

$$Massa\ específica = \frac{massa\ de\ cal}{volume\ de\ líquido\ deslocado} \quad (9)$$

O conjunto de ensaios realizados permitiu a caracterização dos materiais empregados. Os resultados estão resumidos na Tabela 9.

Tabela 9 – Características dos materiais de estudo

Agregado	Massa específica (g/cm ³)	Massa específica (g/cm ³)	Absorção d'água (%)	Equivalente de areia (%)	Teor de Ligante (%)
Fresado Graúdo	2,661	2,610	1,17	-	4,36
Fresado Miúdo	2,562	-	-	-	-
Brita 1	2,958	2,868	1,62	-	-
Pó de Pedra	2,850	-	-	51,47	-
Cal Hidratada	2,585	-	-	-	-

Fonte: Do autor.

3.2.8 Cálculo do Teor Preliminar de Emulsão Asfáltica

O método utilizado foi o de dosagem por superfície específica dos agregados, desprezando o ligante contido no material fresado. Este procedimento se resume na fórmula de Vogt, mas adaptada por Duriez para as peneiras brasileiras (BERNUCCI et al, 2008), conforme a equação 10.

$$100 \sum = 0,12P3 + 0,33P2 + 0,81P1 + 21,9S1 + 135F \quad (10)$$

Onde:

\sum = superfície específica dos agregados;

P3 = massa do material retido entre as peneiras 3/4'' - 1/2'';

P2 = massa do material retido entre as peneiras 1/2'' - 4;

P1 = massa do material retido entre as peneiras N°4 – N°10;

S1 = massa do material retido entre as peneiras N°80 – N°200;

F = massa do material passante na peneira N°200.

A seguir, calculou-se o teor de asfalto residual (p), em relação a massa dos agregados da mistura, através da equação 11.

$$p = K \times \sum \times 0,2 \times 1,01 \quad (11)$$

Onde:

K = Módulo de riqueza; para PMFs densos, Santana (1993) indica o uso de 3,2~4,5.

O teor de asfalto (p') e o teor de emulsão asfáltica ($p'ea$) sobre o total da mistura asfáltica se calculam com as equações 12 e 13.

$$p' = \frac{100 \times p}{100 + p} \quad (12)$$

$$p'ea = \frac{100 \times p'}{t} \quad (13)$$

Onde:

t = teor percentual em massa de asfalto na emulsão asfáltica.

Com este teor preliminar de emulsão calculado, foram moldados os CP's de cada mistura para as análises volumétricas e mecânicas.

3.2.9 Dosagem Marshall

Os corpos de prova foram executados de acordo com o que Bruce Marshall propôs em 1940 (BALBO, 2007). No Brasil, a norma do DNER ME 107 (DNER, 1994) deve ser seguida. De acordo com a norma, 3 corpos de prova de cada percentual com no mínimo 5 teores de ligantes diferentes devem ser moldados, a partir do conhecimento do teor de emulsão preliminar.

O controle da moldagem deve ser rigoroso, porque o pré-misturado a frio apresenta resistências baixas se comparado a misturas asfálticas quentes. A compactação deve ser feita com 75 golpes em cada face, como é mostrado na Figura 12, e então os CPs devem ir a estufa por 24 horas. Retirando os CP's da estufa ainda se espera 2 horas para que se retire os moldes, aferindo-se as medidas de diâmetro e de altura.

Figura 12 – Compactação dos corpos de prova Marshall



Fonte: Do autor.

3.2.10 Densidade aparente

O método 6.3 do DNER - ME 117 (DNER, 1994) foi utilizado neste trabalho, pois as misturas teriam mais que 10% de vazios. Inicialmente, pesa-se o corpo de prova seco, a seguir envolve-se ele com fita adesiva com uma densidade conhecida, pesa-se novamente. Derrete-se a parafina, de densidade previamente conhecida e aplica-se por cima do CP com fita, espera-se secar e pesa-se. Finalmente o CP é imerso e tem seu peso aferido.

O cálculo do método é realizado através da Equação 14.

$$d = \frac{Par}{P3 - P4 - \frac{P2}{df} - \frac{P3-P1}{dp}} \quad (14)$$

Onde:

d= densidade aparente do corpo de prova;

Par = peso do corpo de prova, determinado ao ar;

dp = densidade aparente da parafina empregada (~ 0,89);

P1 = peso do corpo de prova com fita adesiva;

P2 = peso da fita adesiva;

P3 = peso do corpo de prova com fita adesiva e recoberto com parafina, ao ar;

P4 = peso do corpo de prova com fita adesiva e recoberto com parafina, imerso em água;

df = densidade aparente da fita adesiva ($\sim 0,97$).

3.2.11 Densidade máxima teórica

A densidade máxima teórica (DMT) é igual à razão entre a massa do agregado mais o ligante asfáltico e a soma dos volumes dos agregados, vazios impermeáveis não preenchidos com asfalto e o total de asfalto. O método adotado nesse trabalho foi o de ponderação das densidades reais dos materiais que compõem a mistura asfáltica. A equação 15 foi utilizada para o cálculo.

$$\text{Densidade máxima teórica} = \frac{P_{cap} + P_1 + P_2 + \dots + p_n}{\frac{P_{cap}}{G_{cap}} + \frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}} \quad (15)$$

Onde:

Pi= pesos;

Gi= densidades reais;

3.2.12 Determinação do volume de vazios

O volume de vazios está diretamente associado à densidade aparente da mistura asfáltica. Para determiná-lo é possível utilizar o método regulamentado pela NBR 16273 (ABNT, 2014), conforme apresentado na equação 16.

$$V_v = 100 \times \frac{(G_{mm} - G_{mb})}{G_{mm}} \quad (16)$$

Onde:

Vv: volume de vazios

Gmm: densidade máxima medida da mistura asfáltica solta;

Gmb: densidade relativa aparente do corpo de prova compactado.

3.2.13 Estabilidade e fluência Marshall

De acordo com a norma do DNER-ME 107 (DNER, 1994) os CP's devem ser colocados à temperatura de 40°C por 2 horas. Depois deste tempo, devem ser colocados no molde de fluência (Figura 13) junto ao equipamento de compressão.

Figura 13 – CP sendo rompido para o ensaio de estabilidade e fluência



Fonte: Do autor.

Os CP's que não se enquadram e diferem do que pede a norma, devem ser retificados através do fator de correção, conforme a equação 17.

$$f = 927,23 h^{-1,64} \quad (17)$$

Onde:

f = fator de correção;

h = média aritmética da espessura dos corpos de prova.

3.2.14 Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração é determinada conforme o ensaio especificado na Norma DNIT-ME 136 (DNIT, 2010). O ensaio consiste em aplicar uma carga estática de compressão distribuída ao longo de duas geratrizes opostas, com o intuito de obter as tensões de tração por

meio do diâmetro horizontal, perpendicularmente à carga, sendo a medida resultante a resistência à tração.

Figura 14 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Do autor.

Aplica-se uma carga progressiva até a ruptura do corpo de prova, com o valor resultante é calculada a resistência à tração, conforme a equação 18.

$$\sigma_r = \frac{2F}{\pi DH} \quad (18)$$

Onde:

σ_r = resistência à tração;

F = carga de ruptura;

D = diâmetro do corpo de prova;

H = altura do corpo de prova.

3.2.15 Deformação permanente

O ensaio de *creep* estático foi utilizado para verificar a deformação permanente das misturas de pré-misturado a frio. No procedimento, aplica-se uma carga constante de compressão, no sentido axial da amostra (BERNUCCI, 2008). A prensa de tipo Bishop (Figura

15) para adensamento de solos é utilizada e nela aplicam-se cargas para que uma pressão de 0,56 MPa seja alcançada, o que corresponde a pressão de um pneu de um eixo padrão.

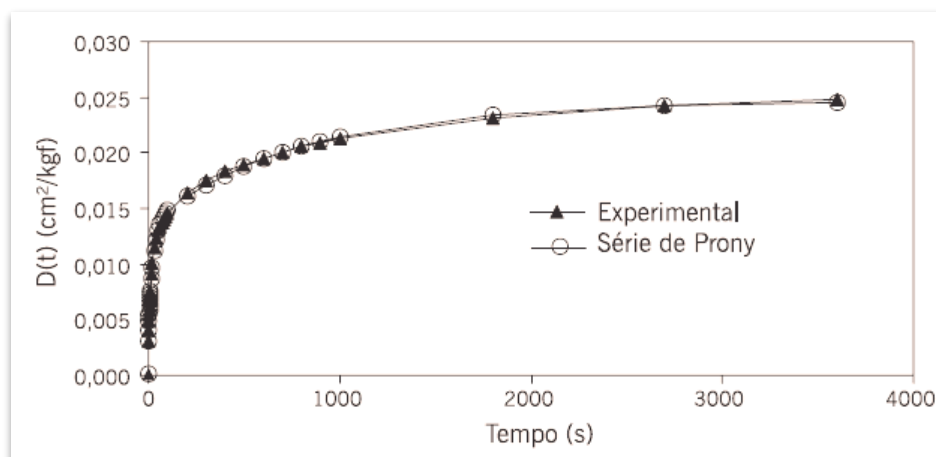
Figura 15 – Equipamento de compressão durante ensaio de *creep* estático



Fonte: Do autor.

Foi ensaiado um corpo de prova para cada mistura, com as amostras repousando 24 horas a uma temperatura de 25°C e um corpo de prova de cada mistura com eles repousando na estufa a uma temperatura de 40°C. Nestas temperaturas eles foram ensaiados a uma carga constante.

Registrou-se a leitura do extensômetro a cada tempo previamente determinado e montou-se uma tabela. Os tempos foram 7,5 s, 15 s, 30 s, 60 s, 120 s, 240 s, 480 s, 900 s, 1800 s. Um gráfico composto pelos eixos deformação e tempo foi executado, apresentando um modelo semelhante ao realizado por Souza e Soares (2003), que pode ser visto no Gráfico 2.

Gráfico 2 – Função fluência de uma amostra do ensaio de *creep*

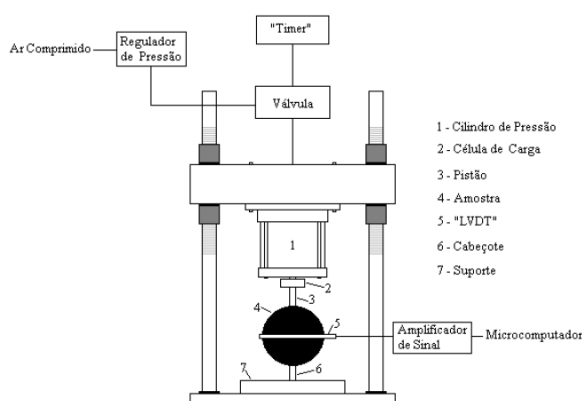
Fonte: Souza e Soares, 2003.

3.2.16 Módulo de resiliência

O ensaio para determinar o módulo de resiliência consiste em aplicar-se um carregamento de compressão pulsante repetidas vezes, ao longo de toda estrutura diametral oposta, e assim medir suas deformações horizontais. O CP não é levado a ruptura, pois utiliza um carregamento equivalente a um percentual de aproximadamente 30% da resistência à tração da amostra.

O pistão que aplica o carregamento repetidas vezes, é ligado a uma célula de carga distribuída por frisos na amostra. As deformações sofridas pela amostra são verificadas por um L.V.D.T (*Linear Variable Differential Transducer*). O equipamento é colocado em uma câmara com temperatura controlada. A Figura 16 mostra o equipamento utilizado no ensaio e seu esquemático de funcionamento.

Figura 16 – Esquemático do funcionamento e equipamento do laboratório do LAPAV



Fonte: SPECHT (2013) e do autor.

O módulo de resiliência instantâneo, foi determinado através do ensaio de tração indireta por compressão diametral cíclica, baseado no protocolo P07 versão 1.1 de agosto de 2001 do programa SHRP/LTPP. De acordo com este protocolo, o módulo resiliente é determinado pelo gráfico deformação-tempo, onde duas regressões lineares são usadas para cada ciclo. Para cada ciclo, a deformação instantânea é calculada pela subtração do valor de deformação no ponto de intersecção de duas linhas de progressão, pelo valor de máxima deformação.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

São apresentados neste capítulo os resultados dos ensaios realizados nas amostras com as diferentes misturas propostas. Estes resultados propiciaram uma comparação entre os valores encontrados para cada mistura e uma posterior análise dos parâmetros.

4.1 Ajuste granulométrico

Utilizando os resultados de granulometria dos materiais, foi possível enquadrar em uma faixa de projeto de acordo com a norma DNIT-ES 153 (DNIT, 2010). Os agregados utilizados ficaram melhores aproveitados dentro da Faixa A (Tabela 10).

Tabela 10 – Faixa A do DNIT utilizada para as misturas

Peneiras	Mm	A	Tolerância de projeto
1"	25,4	100	± 7%
3/4"	19,1	75-100	± 7%
1/2"	12,7	-	± 7%
3/8"	9,5	30-60	± 7%
Nº 4	4,8	10-35	± 5%
Nº 10	2,0	5-20	± 5%
Nº 200	0,075	0-5	± 2%
Teor de Betume Solúvel no CS2 %		4-6	± 2%

Fonte: DNIT-ES 153 (DNIT, 2010, p. 4).

A primeira mistura, composta de fresado, brita 1 e pó de pedra, apresenta as porcentagens dos materiais supracitados conforme a Tabela 11.

Tabela 11 – Composição granulométrica da mistura 1

Peneira	Fresado	Brita 1	Pó de Pedra	Curva de Projeto
#	Passante (%)	Passante (%)	Passante (%)	Passante (%)
1"	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4'	86,60	97,00	100,00	89,87
1/2'	71,40	43,50	100,00	65,86
3/8'	60,84	13,60	100,00	50,99
nº 4	33,72	0,40	99,30	28,67
nº 10	13,86	0,40	75,20	13,56
nº 200	0,74	0,30	9,10	1,05
COMPOSIÇÃO	70,0%	25,0%	5,0%	100,0%

Fonte: Do autor.

A segunda mistura fez uso de fresado, brita 1 em mesma proporção que a anterior, sendo introduzido 1% de cal, de modo que se reduziu de 5% para 4% o percentual de pó de pedra. Sua composição é apresentada na Tabela 12.

Tabela 12 – Composição granulométrica da mistura 2

Peneira	Fresado	Brita 1	Pó de Pedra	Cal Hidratada	Curva de Projeto
#	Passante (%)	Passante (%)	Passante (%)	(%)	Passante (%)
1"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4'	86,60	97,00	100,00	100,00	89,87
1/2'	71,40	43,50	100,00	100,00	65,86
3/8'	60,84	13,60	100,00	100,00	50,99
nº 4	33,72	0,40	99,30	100,00	28,68
nº 10	13,86	0,40	75,20	100,00	13,81
nº 200	0,74	0,30	9,10	94,90	1,91
COMPOSIÇÃO	70,0%	25,0%	4,0%	1,0%	100,0%

Fonte: Do autor.

A mistura 3 continua com os mesmos materiais, porém aumentou-se a quantidade de cal para 2% e com isso foi reduzido o percentual de pó de brita utilizado para 3%. A

Tabela 13 mostra estas mudanças e como ficou a curva de projeto.

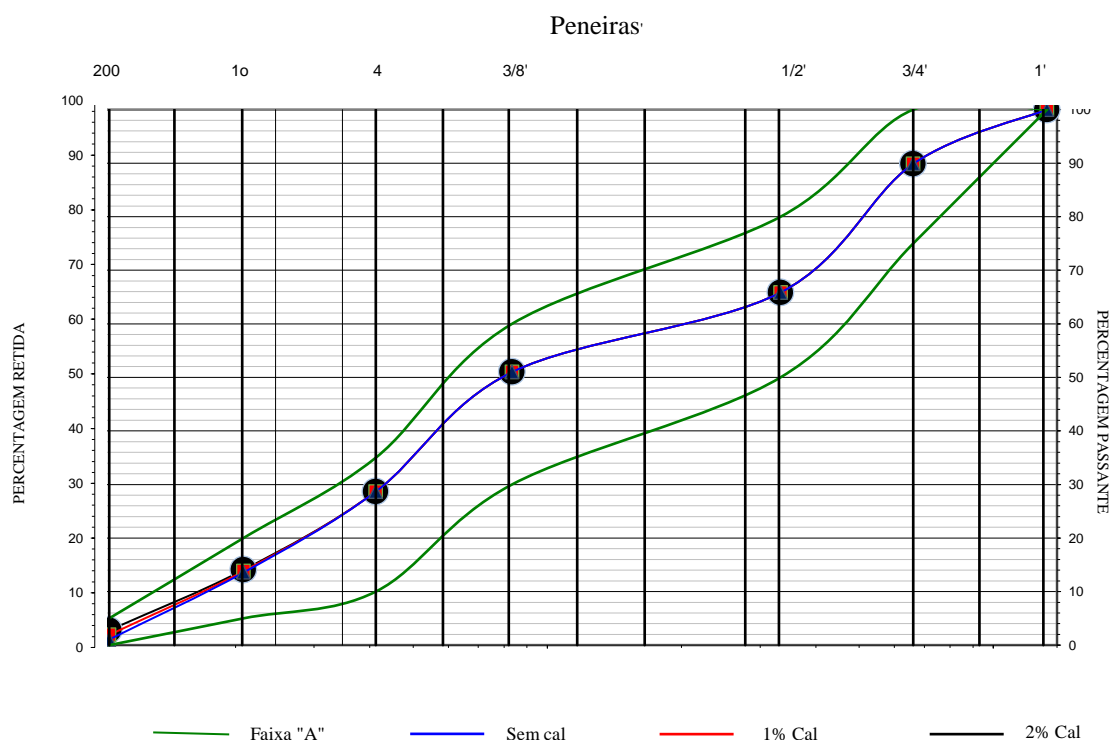
Tabela 13 – Composição granulométrica da mistura 3

Peneira	Fresado	Brita 1	Pó de Pedra	Cal Hidratada	Curva de Projeto
#	Passante (%)	Passante (%)	Passante (%)	(%)	Passante (%)
1"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4'	86,60	97,00	100,00	100,00	89,87
1/2'	71,40	43,50	100,00	100,00	65,86
3/8'	60,84	13,60	100,00	100,00	50,99
nº 4	33,72	0,40	99,30	100,00	28,68
nº 10	13,86	0,40	75,20	100,00	14,86
nº 200	0,74	0,30	9,10	94,90	2,76
COMPOSIÇÃO	70,0%	25,0%	3,0%	2,0%	100,0%

Fonte: Do autor.

Com as tabelas apresentadas anteriormente, montou-se o Gráfico 3. Nele, é visto que as mudanças da composição, só alteraram os valores das peneiras #10 e #200, por causa que a cal é um material que só interfere nestas duas peneiras. É observado também que as 3 misturas estão com as curvas de projeto bem posicionadas dentro da faixa tolerante de projeto.

Gráfico 3 – Curvas granulométricas das misturas



Fonte: Do autor.

4.2 Teor preliminar de emulsão asfáltica

Conforme descrito na metodologia, o teor preliminar de emulsão asfáltica foi calculado a partir da fórmula de Vogt adaptada por Duriez (BERNUCCI et al, 2008), e apresentou os seguintes resultados expressos na Tabela 14 abaixo:

Tabela 14 – Teores preliminares

Mistura	Teor de Cal (%)	Teor preliminar de emulsão asfáltica (%)
1	0	5,51
2	1	6,73
3	2	7,93

Fonte: Do autor.

Para determinação do teor de projeto foram moldados 15 corpos de prova a partir dos teores preliminares para cada mistura, sendo 3 CP's para cada teor. A mistura 1: 5% até 7% variando 0,5%. A mistura 2 de 6% a 8% e a mistura 3 de 7% a 9%, também de 0,5% em 0,5%.

4.3 Resultados volumétricos

Os parâmetros volumétricos são importantes, pois através deles as misturas asfálticas podem ser analisadas e seu desempenho em campo pode ser presumido. São apresentados na Tabela 15, as densidades aparentes de cada mistura em relação ao teor de emulsão utilizado.

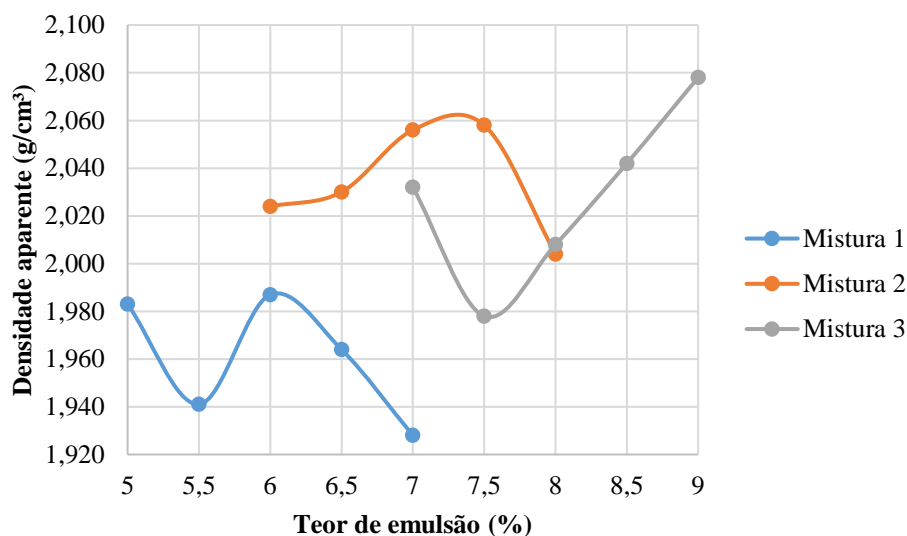
Tabela 15 – Densidades aparentes das misturas estudadas

Mistura 1		Mistura 2		Mistura 3	
Teor Asfalto (%)	Densidade (g/cm3)	Teor Asfalto (%)	Densidade (g/cm3)	Teor Asfalto (%)	Densidade (g/cm3)
5	1,983	6	2,024	7	2,032
5,5	1,941	6,5	2,030	7,5	1,978
6	1,987	7	2,056	8	2,008
6,5	1,964	7,5	2,058	8,5	2,042
7	1,928	8	2,004	9	2,078

Fonte: Do autor.

No Gráfico 4 são comparados os valores de densidade de cada mistura, em relação aos seus respectivos teores. Cada mistura com sua curva respectiva.

Gráfico 4 – Comparação entre a relação da densidade aparente x teor de emulsão



Fonte: Do autor.

Percebe-se pelos gráficos que os teores ótimos referentes as densidades aparentes mais altas são:

- a) Mistura 1: 6%;
- b) Mistura 2: 7,5%;
- c) Mistura 3: 9%.

A Densidade Máxima Teórica (DMT) foi o próximo critério analisado. Ela foi calculada conforme visto no Capítulo 3, a Tabela 16 mostra a relação dos teores de emulsão com a densidade máxima teórica de cada mistura. Nela, é visto que quanto maior o teor, menor será a densidade máxima teórica. Este fato ocorre, pois, o componente agregado-ligante se torna menos denso.

Tabela 16 – Densidades máximas teóricas das misturas estudadas

Mistura 1		Mistura 2		Mistura 3	
Teor Asfalto (%)	DMT (g/cm3)	Teor Asfalto (%)	DMT (g/cm3)	Teor Asfalto (%)	DMT (g/cm3)
5	2,356	6	2,300	7	2,247
5,5	2,329	6,5	2,274	7,5	2,222
6	2,302	7	2,249	8	2,198
6,5	2,276	7,5	2,224	8,5	2,174
7	2,251	8	2,199	9	2,151

Fonte: Do autor.

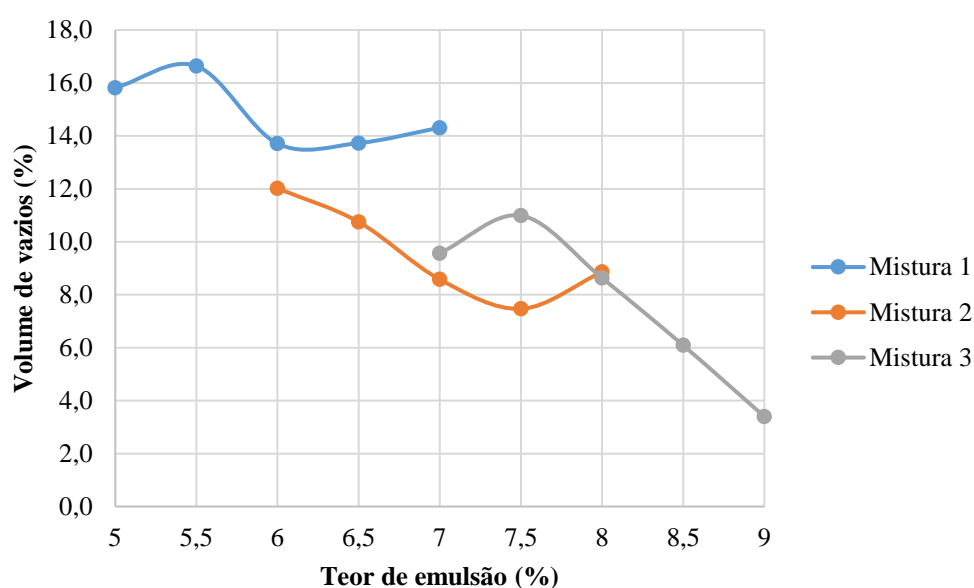
O volume de vazios foi analisado a seguir, utilizando as densidades aparentes obtidas anteriormente. A Tabela 17 mostra os resultados e o Gráfico 5 expõe para melhor compreensão.

Tabela 17 – Volume de Vazios das misturas estudadas

Mistura 1		Mistura 2		Mistura 3	
Teor Asfalto (%)	Volume de Vazios (%)	Teor Asfalto (%)	Volume de Vazios (%)	Teor Asfalto (%)	Volume de Vazios (%)
5	15,82	6	12,02	7	9,57
5,5	16,64	6,5	10,75	7,5	10,99
6	13,71	7	8,58	8	8,63
6,5	13,73	7,5	7,47	8,5	6,09
7	14,31	8	8,86	9	3,40

Fonte: Do autor.

Gráfico 5 – Comparativo da relação do volume de vazios x teor de emulsão



Fonte: Do autor.

É visto através destes resultados, que os valores de vazios das misturas asfálticas decaem, quando se aumenta o teor, pelo preenchimento dos vazios pela emulsão asfáltica. Os valores definidos pela norma de volume de vazios variam de 5 a 30% pela norma para pré-misturados a fio ES -153 (DNIT, 2010). Segundo ABEDA (2001), os resultados obtidos se encaixam no intervalo de misturas densas, que varia de 5 a 15% de vazios. Para a mistura 1, o teor ótimo segundo o mais baixo volume de vazios foi de 6%, para a mistura 2 foi de 7,5% e para a mistura 3 foi de 9%.

4.4 Resultados dos ensaios mecânicos das misturas

As três misturas foram submetidas ao Ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall, a fim de se obter o teor ótimo nesse parâmetro. As tabelas 18,19 e 20 demonstram todos os valores obtidos com o ensaio, e o Gráfico 6 compara as misturas.

Tabela 18 – Estabilidade e Fluência Marshall para os 5 teores de emulsão da mistura 1

CP's / Teores	Estabilidade (kgf)	Fluência (mm)	Espessura (mm)	Fator	Estabilidade Final (kgf)	Estabilidade Média (kgf)	Fluência Média (mm)
CP1/5	330	3,8	64	0,99	326,7	295,35	3,17
CP2/5	293	2,8	64	0,99	290,07		
CP3/5	272	2,9	64	0,99	269,28		
CP1/5,5	260	4,1	64	0,99	257,4	239,40	4,17
CP2/5,5	200	4,2	65	0,96	192		
CP3/5,5	280	4,2	65	0,96	268,8		
CP1/6	220	5,4	64	0,99	217,8	253,77	4,87
CP2/6	257	4,2	64	0,99	254,43		
CP3/6	292	5	64	0,99	289,08		
CP1/6,5	237	5,4	64	0,99	234,63	226,83	5,67
CP2/6,5	238	5,6	64	0,99	235,62		
CP3/6,5	219	6	65	0,96	210,24		
CP1/7	185	8	67	0,92	170,2	159,47	7,37
CP2/7	172	7,2	67	0,92	158,24		
CP3/7	163	6,9	67	0,92	149,96		

Fonte: Do autor.

Observa-se nos resultados que a estabilidade diminui com o aumento do teor de emulsão, tendo o valor mais alto na extremidade de menor teor de emulsão e mais baixo na outra extremidade. Em contrapartida a fluência tem o efeito contrário, o que já era de se esperar, ela cresce com o aumento de teor de emulsão.

Tabela 19 – Estabilidade e Fluência Marshall para os 5 teores de emulsão da mistura 2

CP's / Teores	Estabilidade (kgf)	Fluência (mm)	Espessura (mm)	Fator	Estabilidade Final (kgf)	Estabilidade Média (kgf)	Fluência Média (mm)
CP1/6	258	4,6	62	1,04	268,32	297,00	4,70
CP2/6	317	4,7	62	1,04	329,68		
CP3/6	316	4,8	62	1,04	328,64		
CP1/6,5	310	5	63	1,01	313,1	352,67	5,20
CP2/6,5	390	4,5	62	1,04	405,6		
CP3/6,5	358	6,1	62	1,04	372,32		
CP1/7	385	4,1	63	1,01	388,85	415,33	4,33
CP2/7	455	4,2	63	1,01	459,55		
CP3/7	406	4,7	63	1,01	410,06		
CP1/7,5	390	6	63	1,01	393,9	402,33	5,73
CP2/7,5	442	5,4	63	1,01	446,42		
CP3/7,5	375	5,8	63	1,01	378,75		
CP1/8	373	4,1	63	1,01	376,73	350,67	4,87
CP2/8	392	4,1	64	0,99	388,08		
CP3/8	287	6,4	64	0,99	284,13		

Fonte: Do autor.

Nessa mistura tem-se uma estabilidade maior com 7% de teor de ligante e as duas extremidades decrescem. A fluência apresenta oscilação, tendo o menor valor junto com a maior estabilidade.

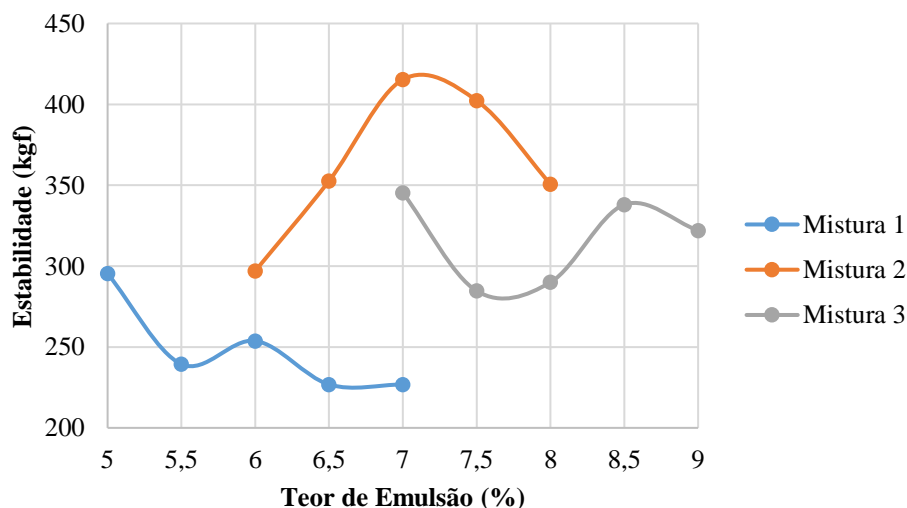
Tabela 20 – Estabilidade e Fluência Marshall para os 5 teores de emulsão da mistura 3

CP's / Teores	Estabilidade (kgf)	Fluência (mm)	Espessura (mm)	Fator	Estabilidade Final (kgf)	Estabilidade Média (kgf)	Fluência Média (mm)
CP1/7	399	5,4	62	1,04	414,96	345,33	5,20
CP2/7	388	4,4	62	1,04	403,52		
CP3/7	249	5,8	62	1,04	258,96		
CP1/7,5	254	5,9	64	0,99	251,46	284,67	5,07
CP2/7,5	419	5,1	64	0,99	414,81		
CP3/7,5	181	4,2	64	0,99	179,19		
CP1/8	209	4,3	64	0,99	206,91	290,00	5,07
CP2/8	344	4,9	64	0,99	340,56		
CP3/8	317	6	63	1,01	320,17		
CP1/8,5	311	4,9	63	1,01	314,11	338,00	5,43
CP2/8,5	374	6,1	63	1,01	377,74		
CP3/8,5	329	5,3	63	1,01	332,29		
CP1/9	341	7,8	63	1,01	344,41	322,00	6,80
CP2/9	299	6,8	63	1,01	301,99		
CP3/9	326	5,8	63	1,01	329,26		

Fonte: Do autor.

A mistura 3 assim como a mistura 2 possui a maior estabilidade com um teor de ligante igual a 7%. A fluência apresenta oscilação, tendo o menor valor junto com a maior estabilidade. O Gráfico 6 compara a estabilidade de cada mistura em relação com o teor de emulsão utilizado.

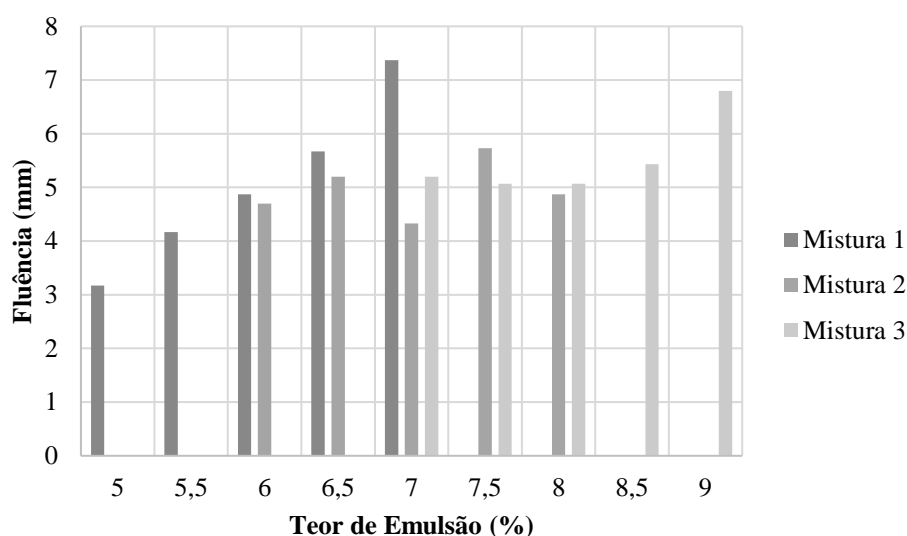
Gráfico 6 – Comparativo da relação da estabilidade x teor de emulsão



Fonte: Do autor.

É percebido que há maior estabilidade nas misturas com cal. Este fato pode ser explicado, pela cal preencher melhor os vazios. Entretanto é visto também que quando se aumenta o teor de ligante na mistura a estabilidade tende a cair, possivelmente porque no fresado já existe betume na composição, o que faz escorregar o betume existente na emulsão, perdendo assim estabilidade. Em seguida tem-se o Gráfico 7, que compara a fluência de cada mistura em relação com o teor de emulsão utilizado.

Gráfico 7 – Comparativo da fluência x teor de emulsão



Fonte: Do autor.

Observa-se que houve variação nas fluências de cada mistura, a mistura 1 apresentou as maiores variações, a mistura 3 as menores. As misturas 1 e 2 apresentam fluências dentro do que pede a norma 153 /10 ES (DNIT, 2010) que é de 2,0 a 4,5 mm, porém a mistura 3 não apresenta nenhum valor de fluência que se enquadre dentro do que pede a norma.

4.5 Escolha do teor de emulsão de projeto

Segundo Bernucci (2008), o teor de projeto deve ser determinado levando em conta os critérios de Estabilidade Marshall, Volume de vazios e Densidade aparente. A Tabela 21 abaixo demonstra como foi feita essa tomada de decisão para cada mistura.

Tabela 21 – Parâmetros para escolha do teor de projeto

Mistura	Parâmetros	Teor Ótimo
1	Volume de Vazios	6%
	Densidade Aparente	6%
	Estabilidade Marshall	5%
	Teor de Projeto (Média)	5,70%

2	Volume de Vazios	7,5%
	Densidade Aparente	7,5%
	Estabilidade Marshall	7%
	Teor de Projeto (Média)	7,33%
3	Volume de Vazios	9%
	Densidade Aparente	9%
	Estabilidade Marshall	7%
	Teor de Projeto (Média)	8,30%

Fonte: Do autor.

Com os teores de projeto definidos, é possível compará-los com os teores preliminares calculados. É visto, que os cálculos efetuados foram de grande valia, pois diferem muito pouco dos obtidos através da dosagem. Todos os teores de projeto são maiores que o preliminar, e a maior diferença foi na mistura 3, onde o teor de projeto foi 0,6% maior que o teor preliminar.

A partir do resultado do teor de projeto, foram moldados 4 CP's para cada mistura, estes em sua totalidade foram analisados quanto a sua volumetria, 2 para módulo de resiliência, estes mesmos 2 com acréscimo de mais 1 quanto a resistência de tração e o restante quanto a deformação permanente.

4.6 Resultados volumétricos da mistura com teor de projeto

Foram moldados 4 CP's com os teores ótimos de cada mistura, e seus resultados volumétricos comparados com os resultados dos dados interpolados dos gráficos da moldagem Marshall, presentes no Apêndice A. A Tabela 22 mostra esta comparação.

Tabela 22 – Comparações entre os teores ótimos e os teores interpolados no gráfico Marshall

Mistura	Teor ótimo		Teor interpolado no gráfico Marshall	
	Densidade aparente (g/cm ³)	Volume de vazios (%)	Densidade aparente (g/cm ³)	Volume de vazios (%)
1	1,983	14,44	1,949	15,9
2	2,007	10,05	2,057	7,9
3	2,024	7,32	2,018	7,6

Fonte: Do autor.

Com a Tabela 22, é visto que na mistura 2 destoa um pouco os valores de densidade e volume de vazios, isto se dá pela grande variação do gráfico da moldagem desta mistura. Se for comparado as densidades aparentes e os volumes de vazios do teor ótimo vê-se que está muito coerente nas outras duas misturas. A Tabela 23, mostra o resultado de densidade aparente e

volume de vazios para cada corpo de prova, e para que ensaio mecânico ele será utilizado na sequência da pesquisa.

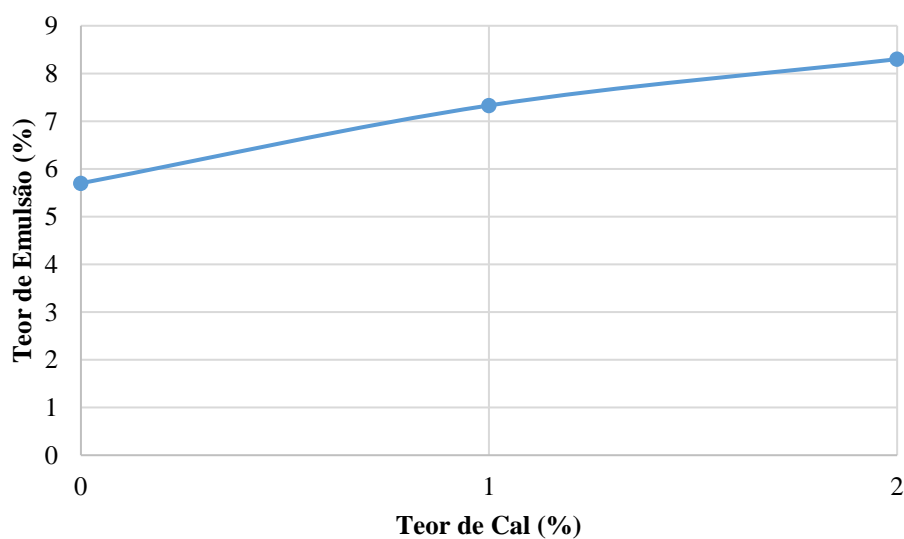
Tabela 23 – Resultados volumétricos da mistura com teor de projeto

Nº CP	Mistura	Ensaio	Densidade aparente (g/cm ³)	Volume de vazios (%)
1	1	Deformação permanente	1,983	14,44
2	1	MR/RT	1,980	14,57
3	1	MR/RT	1,989	14,18
4	1	MR/RT	1,980	14,57
5	2	Deformação permanente	2,016	9,73
6	2	MR/RT	2,001	10,42
7	2	MR/RT	2,000	10,45
8	2	MR/RT	2,010	10,02
9	3	Deformação permanente	2,022	7,40
10	3	MR/RT	2,026	7,25
11	3	MR/RT	2,022	7,41
12	3	MR/RT	2,028	7,11

Fonte: Do autor.

Com os resultados das volumetrias, pode-se comparar os resultados de cada mistura, em função do teor de cal utilizado na composição. O Gráfico 8, mostra a relação do percentual de cal com o teor de emulsão utilizado.

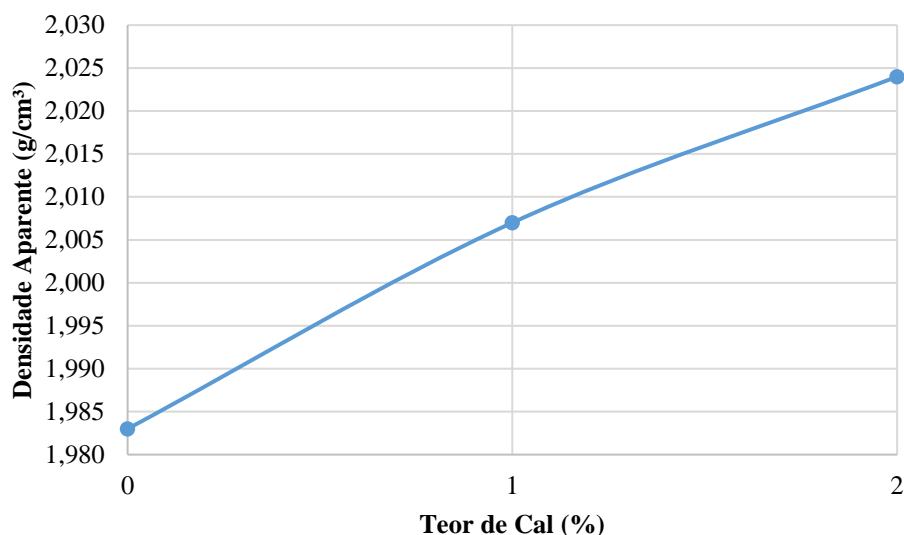
Gráfico 8 – Teor de emulsão em função do teor de cal



Fonte: Do autor.

Observa-se no Gráfico 8, que ao aumentar o percentual de cal utilizado, aumenta-se o teor de emulsão, pela razão da cal ser um material mais fino, quase que sua totalidade é passante na peneira 200, como visto na sua caracterização. O Gráfico 9 mostra que o aumento no percentual de cal, gera um aumento da densidade aparente, pois a mistura ao ter mais cal e mais emulsão, acaba por preencher melhor os vazios.

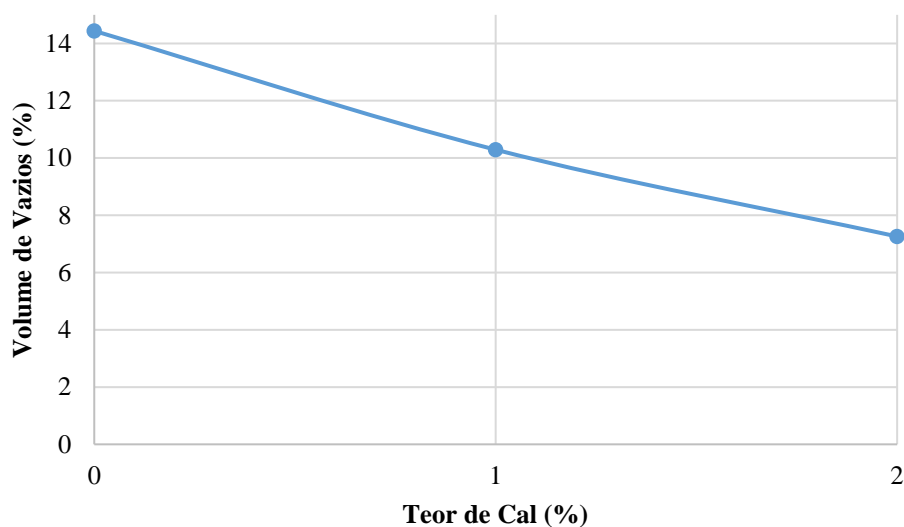
Gráfico 9 – Densidades aparentes em função do teor de cal utilizado



Fonte: Do autor.

Preenchendo melhor os vazios com cal e emulsão, outro efeito ocorre, que é a diminuição do volume de vazios. No Gráfico 10, nota-se esta variação e observa-se que o volume de vazios para a mistura sem cal é quase o dobro daquela que tem 2% de cal introduzido.

Gráfico 10 – Comparativo do volume de vazios com o teor de cal utilizado



Fonte: Do autor.

Com estes gráficos, finalizam-se as análises volumétricas das misturas e fica evidenciado a melhora significativa que faz a utilização da cal na composição. O estudo agora avalia a utilização da cal quanto aos resultados mecânicos.

4.7 Resultados mecânicos da mistura com teor de projeto

Após as análises volumétricas, o ensaio de deformação permanente foi realizado. Em seguida foram enviados CP's para o Laboratório de Pavimentação (LAPAV) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), para execução dos ensaios de módulo de resiliência e também para o ensaio de resistência a tração por compressão diametral.

4.7.1 Resistência à tração

Para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, a norma 136/10 ME (DNIT, 2010) foi seguida, conforme o capítulo anterior. Os resultados apresentados na Tabela 24 foram encontrados. O Apêndice B mostra a tabela completa.

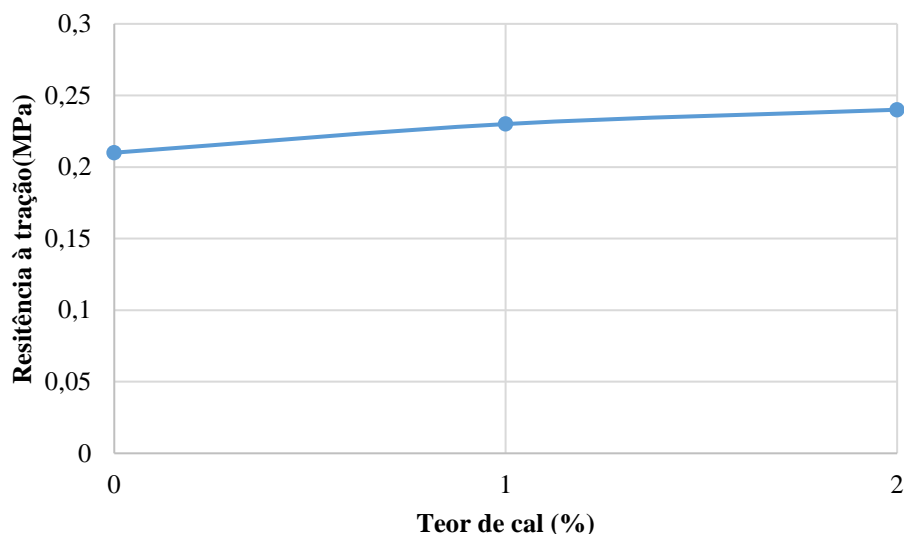
Tabela 24 – Resultados de resistência à tração por compressão diametral

Nº CP	Mistura	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
2	1	0,21	0,21	0,02
3		0,23		
4		0,19		
6	2	0,23	0,22	0,01
7		0,22		
8		0,22		
10	3	0,25	0,24	0,02
11		0,23		
12		0,25		

Fonte: Do autor.

Para a resistência à tração, não existe nenhum critério descrito por norma como parâmetro. Pode-se confrontar com os dados mínimos previstos pela norma 031/06 ES (DNIT,2006), para CBUQ, ou pode se comparar com outros autores. O Gráfico 11 expõe de maneira mais clara os valores obtidos para cada mistura.

Gráfico 11 – Resistência à tração por compressão diametral em função do teor de cal utilizado em cada mistura



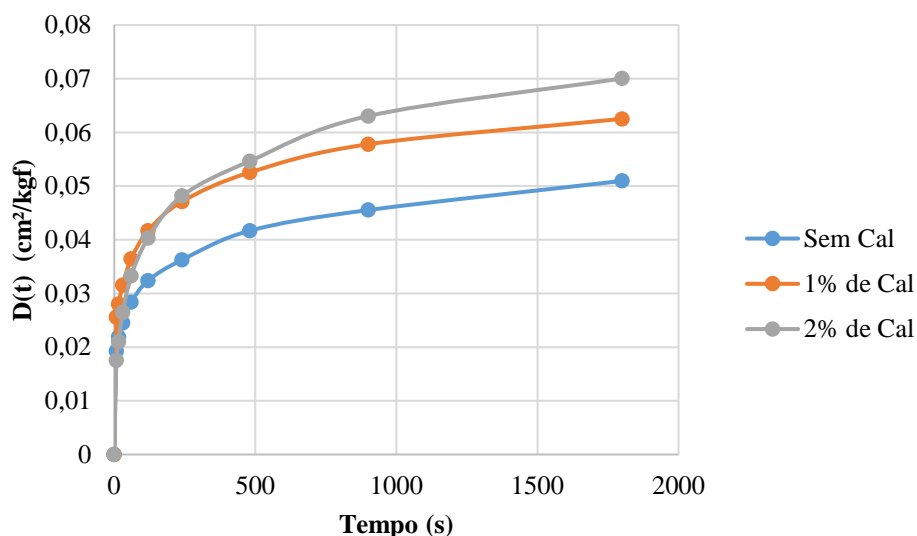
Fonte: Do autor.

Nota-se pelo gráfico, que se comparado a CPs de CBUQ citados na norma 031/06 ES (DNIT, 2006), os valores de resistência à tração das 3 misturas estão mais baixos que 0,65MPa. É visto também que ao se adicionar e aumentar o teor de cal utilizado na mistura, aumenta-se a resistência à tração, comprovando o que a bibliografia relata. Comparando-se com outros autores citados no referencial teórico, Pereira (2015), utilizaram uma mistura com e outra sem adição de cal e também observou um acréscimo no valor da resistência à tração na mistura em que a cal foi adicionada, o valor aumentou de 0,1315MPa para 0,157MPa, praticamente a mesma variação encontrada neste trabalho.

4.7.2 Deformação permanente

Como não existe nenhuma norma específica, para as misturas pré-misturadas a frio referentes a deformação permanente, este ensaio foi realizado para se comparar a diferente deformação de cada mistura e também a deformação com o aumento da temperatura empregada. O Gráfico 12 mostra os resultados dos corpos de prova a temperatura de 25°C. Todos os dados referentes ao ensaio encontram-se no Apêndice B.

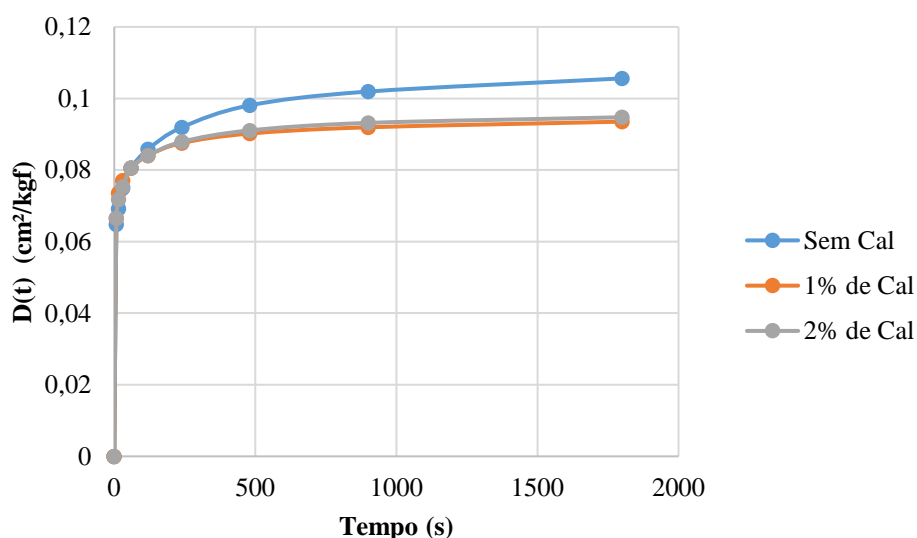
Gráfico 12 – Tempo x Deformação para a temperatura de 25°C



Fonte: Do autor.

Conforme mostra o Gráfico 12, a maior deformação ocorre no primeiro minuto de aplicação da carga, a deformação corresponde a aproximadamente 50% da deformação total do ensaio. Depois disso, a deformação tende a estabilizar, não gerando nenhuma deformação significativa. A seguir no Gráfico 13 são apresentados os valores encontrados para os corpos de prova na temperatura de 40°C, para que se veja se há alguma diferença na maneira que os corpos de prova deformam.

Gráfico 13 – Tempo x Deformação para a temperatura de 40°C



Fonte: Do autor.

O Gráfico 13 referente ao ensaio com a temperatura de 40°C, mostra que a deformação no primeiro minuto apresenta aproximadamente 75% da deformação total do período do ensaio.

Isso mostra primeiramente que a deformação ocorre praticamente nos segundos iniciais e com o passar do tempo se estabiliza. Visualiza-se também que a deformação dos CP's com a temperatura de 40°C é maior.

4.7.3 Módulo de resiliência

O ensaio de módulo de resiliência foi realizado em conformidade com a norma DNIT 135/10 (DNIT, 2010). Os resultados obtidos foram os expressos na Tabela 25.

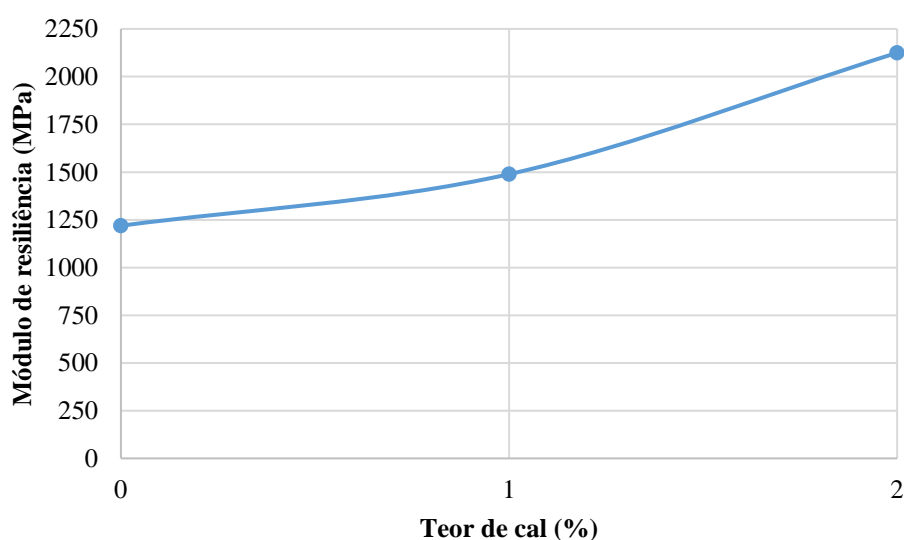
Tabela 25 – Resultados de módulo de resiliência

Nº CP	Mistura	Módulo de resiliência (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
2	1	963	1219	234,5
3		1272		
4		1423		
6	2	1598	1489	128,2
7		1348		
8		1522		
10	3	1957	2125	146,3
11		2194		
12		2224		

Fonte: Do autor.

Não existe um critério estabelecido para a análise de módulos de resiliência para misturas a frio. Comparando os resultados entre si, tem-se o Gráfico 14, analisado.

Gráfico 14 – Módulo de resiliência em função do teor de cal



Fonte: Do autor.

Nota-se pelo Gráfico 14 que ao aumentar o teor de cal, o módulo de resiliência aumenta, crescendo a capacidade que o pré-misturado a frio tem de absorver a energia aplicada, e readquirir a forma original. Comparando com Cerentini et al (2016), citado no referencial teórico, que utilizou 80% de agregado fresado e 20% de pó de brita, obteve 967 MPa de módulo de resiliência, o que não difere muito da mistura realizada neste trabalho, sem adição de cal que é de 1219 MPa.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao fim deste estudo, concluiu-se que o objetivo geral — que se delimitava em avaliar a dosagem de um pré-misturado a frio utilizando material fresado, e os efeitos mecânicos devido à incorporação da cal — foi alcançado. Foram definidos objetivos específicos para se cumprir o objetivo geral, e estes também foram igualmente alcançados durante as diversas etapas da pesquisa. A seguir, são eles expostos:

- a) todo material utilizado na pesquisa foi caracterizado. Com o agregado fresado, a partir do ensaio obteve-se um teor de ligante de 4,36%. Ele apresentou uma granulometria com poucos finos passantes na peneira 200 e também pouco material retido na peneira 3/4'. Isso fez com que fosse necessário realizar as misturas com 70% de material fresado, 25% de brita 1 e 5% de pó de brita. Nas misturas com adição de cal, ao acrescentar-se a cal, a mesma proporção foi retirada de pó de brita. A faixa A do DNIT para este tipo de mistura foi a utilizada, pois nela a faixa ficou melhor enquadrada.
- b) com a moldagem de corpos de prova a partir do teor preliminar calculado, foi possível determinar o teor ótimo de betume para cada porcentagem de cal utilizada. Obtiveram-se os teores de projeto de 5,7%, 7,3% e 8,3% para as misturas sem cal, com 1% de cal e com 2% de cal, respectivamente.
- c) analisando os resultados volumétricos de cada mistura, constatou-se que quanto maior o percentual de cal, maior a densidade e, por consequência, menor o volume de vazios.

- d) foram obtidos para o ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall resultados que satisfazem a norma 153/10 ES (DNIT, 2010), quanto à estabilidade mínima que é de 250kgf em todas as misturas, e quanto a fluência apenas a mistura 1 satisfaz os valores de 2 a 4,5 mm que são estabelecidos. O uso de cal faz com que a estabilidade aumente consideravelmente, tendo seu ápice na mistura 2 chegando a 415,33kgf. Porém, em contrapartida, com o aumento do percentual de cal, aumenta a fluência, e ela chega a 6,8 mm na mistura 2 no momento que tem o maior teor de emulsão.
- e) quanto aos ensaios mecânicos, verificou-se que a adição de cal resultou em um leve aumento da resistência à tração. Da mesma forma, a adição de cal melhorou o desempenho da mistura quanto à deformação permanente para a temperatura de 40 °C, entretanto, o mesmo não foi observado na temperatura de 25 °C. Por fim, o módulo de resiliência também se mostrou influenciado positivamente pela adição de cal, apresentando como resultados médios os valores de 1219 MPa, 1489 MPa e 2125 MPa para as misturas sem cal, com 1% de cal e com 2% de cal, respectivamente.

Através desses resultados, das comparações com outros autores e com os parâmetros da norma, conclui-se que o emprego de material fresado como agregado para pré-misturados a frio é totalmente viável para vias de pouco tráfego e que, ao se adicionar cal hidratada, os efeitos são positivos no comportamento volumétrico e mecânico das misturas estudadas.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileiro de Normas Técnicas. **NBR 12891**: Dosagem de misturas betuminosas pelo método Marshall – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1993.

_____. **NBR 16273**: Misturas asfálticas — Propriedades volumétricas de concreto asfáltico. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____. **NBR 9935**: Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

_____. **NBR 9289**: Cal hidratada para argamassas – Determinação da finura. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

ANTT. Agência Nacional de Transportes Terrestres. **Avaliação de métodos de dosagem de misturas asfálticas e sua relação com as propriedades mecânicas**. Brasília: ANTT, 2014. Disponível em <<http://www.antt.gov.br/index.html>>. Acesso em: 20 mai. 2018.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica**: Materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BARROS, Rafael Falcão. **Utilização do revestimento fresado da BR-104, como material de reforço da camada de base e/ou sub-base**. 2013. 52f. Trabalho de Conclusão (Curso de Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Caruaru, 2013.

BATISTA, Rafael Santos. **Reciclagem do resíduo pela fresagem do concreto asfáltico**. 2016. 52f. Monografia (Especialização em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. 3. ed. Rio de Janeiro: PETROBRÁS/ ABEDA, 2008.

BOCK, André Luiz. **Efeito da incorporação de cal hidratada em concretos asfálticos elaborados com ligante convencional e modificado**. 2012. 143f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

BONFIM, Valmir. **Fresagem de pavimentos asfálticos**. 3. ed. rev. e atual. São Paulo: Exceção Editorial, 2007.

CERENTINI, Nicolas Pieniz. **Dosagem de um pré-misturado a frio utilizando material asfáltico fresado**. 2016. 74f. Trabalho de Conclusão (Curso de Engenharia Civil) – Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2016.

CNT. Confederação Nacional de Transporte. **Boletim Estatístico**. 2017. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/Boletim/boletim-estatistico-cnt>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

DAER. Departamento Autônomo de Estradas e Rodagens. **DAER-ESP 16: Concreto asfáltico**. Rio de Janeiro: DAER, 1991.

DAER-RS. Departamento de Estradas e Rodagens do Rio Grande do Sul. **DAER/RS-EL 105: Determinação de massa específica real, massa específica aparente e absorção de agregado graúdo**. Porto Alegre: DAER, 2001. Disponível em: <<http://www.daer.rs.gov.br/upload/arquivos/201607/27154706-manual-de-ensaios-vol-ii.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2018

_____. **DAER/RS-EL 219: Determinação de módulos de resiliência**. Porto Alegre: DAER, 2001. Disponível em: <<http://www.daer.rs.gov.br/upload/arquivos/201607/27154706-manual-de-ensaios-vol-ii.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

DARTORA, Natalia C. **Caracterização mecânica de uma mistura asfáltica composta por material fresado e cal**. 2015. 88f. Projeto de Pesquisa (Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2015. Disponível em: <<https://www.univates.br/bdu/bitstream/10737/952/1/2015NataliaCattoDartora.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2018.

DAVID, Daniela de. **Misturas asfálticas recicladas a frio: Estudo em laboratório utilizando emulsão de agente de reciclagem emulsionado**. 2006. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagens. **DNER-ME 053**: Misturas betuminosas – percentagem de betume. Rio de Janeiro: DNER, 1994. Disponível em: <http://www.ippuc.org.br/cd_caderno_de_encargos/volume%2003_PDF/DNER-ME%20053-94.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2018.

_____. **DNER-ME 107**: Mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica – ensaio Marshall. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

_____. **DNER-ME 117**: mistura betuminosa – determinação de densidade aparente. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

_____. **DNER-ME 81**: Agregado graúdo – determinação de densidade real. Rio de Janeiro: DNER, 1998. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me081-98.pdf>>. Acesso em: 18 abril. 2018.

_____. **DNER-ME 84**: Agregado miúdo – determinação de densidade real. Rio de Janeiro: DNER, 1995. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me084-95.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

_____. **DNER-ME 085**: Densidade real da cal hidratada. Rio de Janeiro: DNIT, 1994.

_____. **DNER-ME 083**: Agregados – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro: DNIT, 1998.

_____. **DNER-ME 035**: Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro: DNIT, 1998.

_____. **DNER-ME 054**: Determinação do equivalente de areia. Rio de Janeiro: DNIT, 1994.

_____. **DNER-ME 086**: Agregados – Determinação do índice de forma. Rio de Janeiro: DNIT, 1994.

_____. **DNER-ME 059:** Emulsões asfálticas – determinação da resistência à água (adesividade). Rio de Janeiro: DNIT, 1994.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT-ES 153:** Pavimentação asfáltica – Pré-misturado a frio com emulsão catiônica convencional – Especificação de serviço – Rio de Janeiro: DNIT, 2010.

_____. **DNIT-ME 136:** Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Método de Ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2010.

_____. **DNIT: Manual de pavimentação.** 3. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

GUIMARÃES, J. E. P.. **A Cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil. 1 edição.** Associação Brasileira dos Produtores de Cal. Editora PINI. 2002.

GOOGLE MAPS. **Mapas.** 2018. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps>>. Acesso em: 20 abr. 2018.

MOLZ, Carine. **Viabilidade da utilização do material fresado estabilizado granulometricamente em base de pavimentos.** 2017. 65f. Trabalho de conclusão (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017. Disponível em: <http://coral.ufsm.br/engcivil/images/PDF/1_2017/TCC_CARINE%20MOLZ.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2018.

PEREIRA, Marcos R. M. **Estudo sobre incorporação de fresado asfáltico e cal em misturas betuminosas do tipo pré-misturado a frio.** 2015. 78f. Trabalho de conclusão (Engenharia Civil) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, Ijuí, 2015. Disponível em: <<http://bibliodigital.unijui.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/3127/TCC%20-%20Marcos%20%20V10%20final.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 18 mar. 2018.

PROJETO DE CONCRETO ASFÁLTICO ERS/421. 2018. [Arquivo Pessoal].

RAMOS, Celso R. et al. Reciclagem em Usina Gravimétrica no Município do Rio de Janeiro. In: ENCONTRO DO ASFALTO. INSTITUTO BRASILEIRO DO PETRÓLEO, 13, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBP, 1996. 9f.

REIS, A. C. C. **Propriedades mecânicas de misturas asfálticas recicladas em usina protótipo de escala reduzida**. 2013. 115f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2013.


SANTANA, H. **Manual de pré-misturados a frio**. 1. ed. Rio de Janeiro: IBP, 1993.

SOUZA, F. V.; SOARES, J. B. Previsão do comportamento mecânico de misturas asfálticas a partir dos resultados do ensaio de creep estático. **Transporte em transformação VII** – Trabalhos vencedores do Prêmio CNT Produção Acadêmica 2002, Brasília, 2003.

SILVA, C. F. S. C. **Reutilização do resíduo oriundo dos serviços de restauração asfáltica como material alternativo em camadas de pavimentos flexíveis**. 2012. 74f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2012.

SPECHT, L. P. et al. Utilização de material fresado como camada de pavimento: estudo laboratorial e aplicação de campo. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO (RAPv), 42, 12 a 14 nov. 2013. **Anais...** Gramado: ABPv, 2013.

ANEXO A – Certificado com as características do RM – 1C BETUNEL

		BETUNEL INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA			
CERTIFICADO DE QUALIDADE DE PRODUTO ACABADO					
(CÓPIA)			Nº /2018		
PRODUTO: RM-1C DATA DO CARREGAMENTO: 10/9/18 CLIENTE: Giovanela DESTINO: Lajeado VEÍCULO PLACA: MUNICÍPIO: Lajeado HORA: TRANSPORTADOR: OBS: TQ.: 6 TEMPERATURA: °C					
CARACTERÍSTICAS DE ACORDO COM A RESOLUÇÃO ANP Nº 36, DE 13/11/2012 E REGULAMENTO TÉCNICO ANP N.º 6/2012	LIMITES	MÉTODO	REPRODU- TIBILID.(*)	ENCONTRADAS	
				Carrega- mento	Na Obra
VISCOSIDADE SAYBOLT À 50°C,SSF	20 a 200	NBR-14491	± 21%	80	
RESÍDUO POR EVAPORAÇÃO, % peso	62 mín.	NBR-14376	ND	62,8	
PENEIRAMENTO, 0,84mm, % em peso	0,1 máx.	NBR-14393	± 0,08%	0,01	
SEDIMENTAÇÃO, 5 DIAS, % peso	5 máx.	NBR-6570	± 10%	1,4	
CARGA DA PARTÍCULA	Positiva	NBR-6567	ND	POSITIVA	
DESEMULSIBILIDADE, % peso	50 máx.	NBR-6569	± 30%	21	
(*) A diferença entre dois resultados de ensaios, individuais e independentes, obtidos por operadores diferentes trabalhando em laboratórios distintos e em amostras de mesmo material, com a execução correta e normal deste método, pode exceder os valores somente em um caso em vinte. ND - Não Determinado; NA - Não Aplicável O prazo de validade das emulsões asfálticas catiônicas modificados por polímeros elastoméricos será de 30 (trinta) dias a contar da data da comercialização ao consumidor final. Não recomendamos aquecimento de produto para descarga ou na armazenagem, pois poderá alterar suas características.					

APÊNDICE A – Projeto de Pré-misturado a frio

CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Densidade Real do Agregado Graúdo (FRESADO) (DNER-ME 081/98)	
Ensaio 1	
Material saturado, superfície seca (g)	1006,19
Material totalmente submerso (g)	622,76
Material seco em estufa (g)	994,54
Densidade Aparente do Agregado (g/cm ³)	2,624
Densidade Real do Agregado (g/cm ³)	2,675
Absorção do Agregado	1,17%
Ensaio 2	
Material saturado, superfície seca (g)	986,80
Material totalmente submerso (g)	606,78
Material seco em estufa (g)	975,39
Densidade Aparente do Agregado (g/cm ³)	2,597
Densidade Real do Agregado (g/cm ³)	2,646
Absorção do Agregado	1,17%
Resultados finais	
Densidade Aparente do Agregado (g/cm³)	2,610
Densidade Real do Agregado (g/cm³)	2,661
Absorção do Agregado	1,17%

Densidade Real do Agregado Miúdo (FRESADO) (DNER-ME 084/95)	
Ensaio 1	
Amostra de Fresado (g)	200,10
Piquinômetro com tampa, amostra, água (g)	1339,90
Piquinômetro com tampa, cheio d'água (g)	1217,30
Densidade Real do Agregado Miúdo (g/cm ³)	2,582
Ensaio 2	
Amostra de Fresado (g)	200,90
Piquinômetro com tampa, amostra, água (g)	1339,50
Piquinômetro com tampa, cheio d'água (g)	1217,60
Densidade Real do Agregado Miúdo (g/cm ³)	2,543

Resultado final	
Densidade Real do Agregado Miúdo (g/cm³)	2,562

Teor de ligante do fresado (DNER-ME 053/94)	
Ensaio 1	
Prato e amostra (g)	1135,00
Filtro (g)	23,10
Filtro usado (g)	23,19
Prato e amostra secos na estufa (g)	1085,79
Teor de Betume	4,33%
Ensaio 2	
Prato e amostra (g)	1136,50
Filtro (g)	23,10
Filtro usado (g)	23,11
Prato e amostra secos na estufa (g)	1086,52
Teor de Betume	4,40%
Resultado final	
Teor de Betume	4,36%

Densidade Real do Agregado Graúdo (Brita 1) ((DNER-ME 081/98)	
Ensaio 1	
Material saturado, superfície seca (g)	1047,99
Material totalmente submerso (g)	682,61
Material seco em estufa (g)	1031,25
Densidade Aparente do Agregado (g/cm³)	2,868
Densidade Real do Agregado (g/cm³)	2,958
Absorção do Agregado	1,62%
Ensaio 2	
Material saturado, superfície seca (g)	1028,40
Material totalmente submerso (g)	669,90
Material seco em estufa (g)	1012,00

Densidade Aparente do Agregado (g/cm ³)	2,869
Densidade Real do Agregado (g/cm ³)	2,958
Absorção do Agregado	1,62%
Resultados finais	
Densidade Aparente do Agregado (g/cm³)	2,868
Densidade Real do Agregado (g/cm³)	2,958
Absorção do Agregado	1,62%

Densidade Real do Agregado Miúdo (PÓ DE PEDRA) (DNER-ME 084/95)	
Ensaio 1	
Amostra de Pó de pedra(g)	221,76
Piquinômetro com tampa, amostra, água (g)	925,50
Piquinômetro com tampa, cheio d'água (g)	781,84
Densidade Real do Agregado Miúdo (g/cm ³)	2,839
Ensaio 2	
Amostra de Pó de Pedra (g)	192,17
Piquinômetro com tampa, amostra, água (g)	780,52
Piquinômetro com tampa, cheio d'água (g)	655,71
Densidade Real do Agregado Miúdo (g/cm ³)	2,853
Resultado final	
Densidade Real do Agregado Miúdo (g/cm³)	2,846

Densidade Real da Cal Hidratada (DNER-ME 085/94)	
Ensaio 1	
Amostra de Cal g)	49,20
1º volume lido (cm ³)	19,3
2º volume lido (g)	0,3
Densidade Real da Cal Hidratada (g/cm ³)	2,585
Ensaio 2	
Amostra de Cal (g)	192,17

1º volume lido (cm³)	780,52
2º volume lido (cm³)	655,71
Densidade Real da Cal Hidratada (g/cm³)	2,586
Resultado final	
Densidade Real da Cal Hidratada (g/cm³)	2,585

EQUIVALENTE DE AREIA

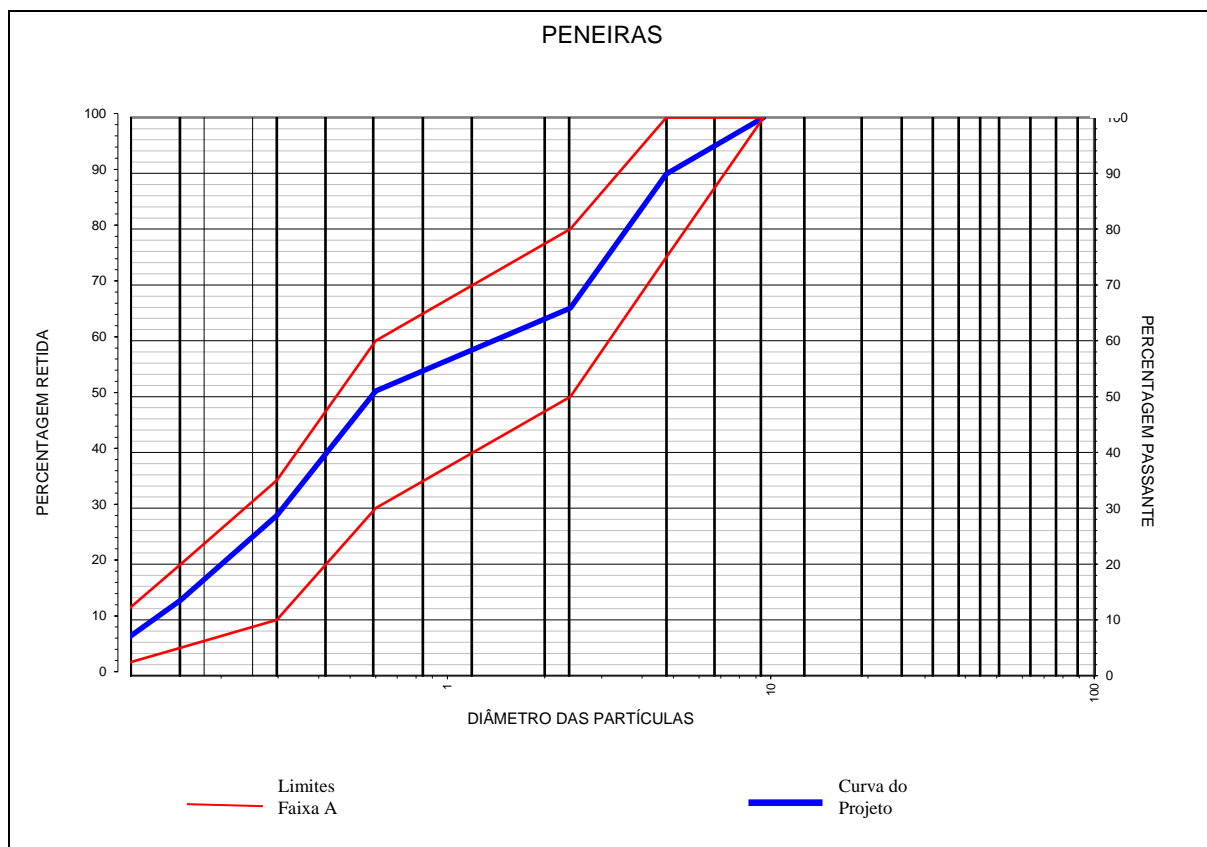
	Proveta 1	Proveta 2	Resultado Final
Leitura 1	16,9	17,1	51,47%
Leitura 2	8,6	8,9	
Equivalente	50,89%	52,05%	

Peneira	GRANULOMETRIA DOS SILOS (% massa, passante)			
	Fresado	Brita 1	Pó-de-pedra	Cal hidratada
1"	96,92	100	100	100
3/4"	86,60	97,00	100	100
1/2"	71,40	43,50	100	100
3/8"	60,84	13,60	100	100
# 4	33,72	0,40	99,30	100
# 10	13,86	0,40	75,20	100
# 200	0,74	0,30	9,10	94,90

GRANULOMETRIA MISTURA 1 (SEM CAL)

Peneira	Fresado	Brita 1	Pó de Pedra	Curva de Projeto
#	Passante (%)	Passante (%)	Passante (%)	Passante (%)
1"	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4'	86,60	97,00	100,00	89,87
1/2'	71,40	43,50	100,00	65,86
3/8'	60,84	13,60	100,00	50,99
n° 4	33,72	0,40	99,30	28,67
n° 10	13,86	0,40	75,20	13,56
n° 200	0,74	0,30	9,10	1,05
COMPOSIÇÃO	70,0%	25,0%	5,0%	100,0%

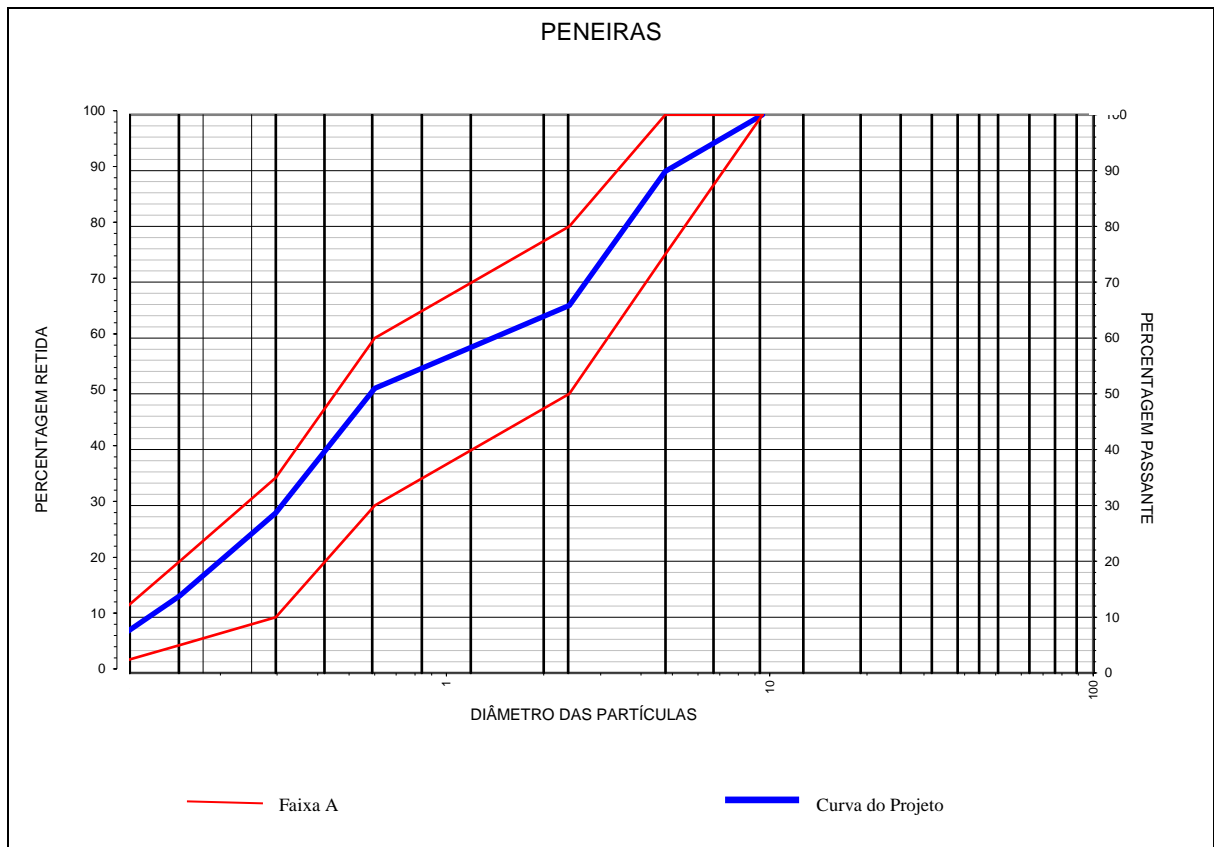
CURVA GRANULOMÉTRICA MISTURA 1



GRANULOMETRIA MISTURA 2 (1% DE CAL)

Peneira #	Fresado Passante (%)	Brita 1 Passante (%)	Pó de Pedra Passante (%)	Cal Hidratada (%)	Curva de Projeto Passante (%)
1"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	86,60	97,00	100,00	100,00	89,87
1/2"	71,40	43,50	100,00	100,00	65,86
3/8"	60,84	13,60	100,00	100,00	50,99
nº 4	33,72	0,40	99,30	100,00	28,68
nº 10	13,86	0,40	75,20	100,00	13,81
nº 200	0,74	0,30	9,10	94,90	1,91
COMPOSIÇÃO	70,0%	25,0%	4,0%	1,0%	100,0%

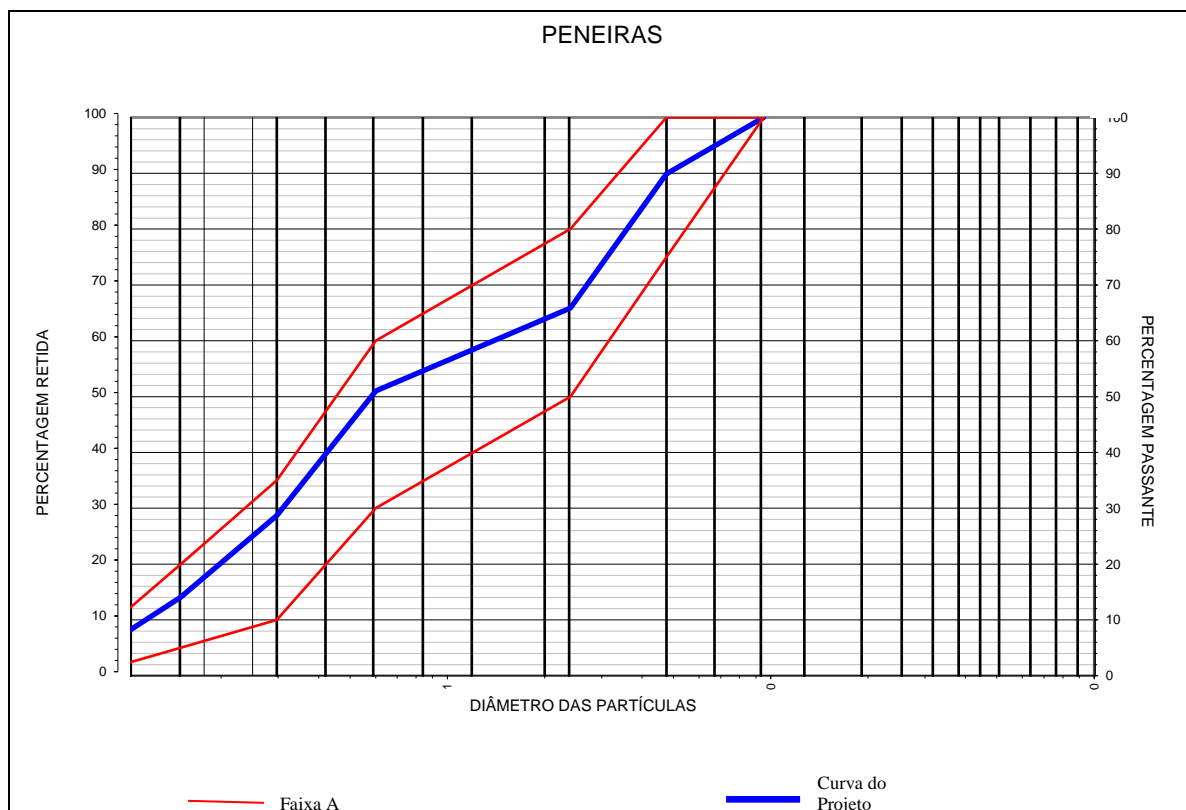
CURVA GRANULOMÉTRICA MISTURA 2



GRANULOMETRIA MISTURA 3 (2% DE CAL)

Peneira #	Fresado Passante (%)	Brita 1 Passante (%)	Pó de Pedra Passante (%)	Cal Hidratada (%)	Curva de Projeto Passante (%)
1"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	86,60	97,00	100,00	100,00	89,87
1/2"	71,40	43,50	100,00	100,00	65,86
3/8"	60,84	13,60	100,00	100,00	50,99
nº 4	33,72	0,40	99,30	100,00	28,68
nº 10	13,86	0,40	75,20	100,00	14,86
nº 200	0,74	0,30	9,10	94,90	2,76
COMPOSIÇÃO	70,0%	25,0%	3,0%	2,0%	100,0%

CURVA GRANULOMÉTRICA MISTURA 3



MONTAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA

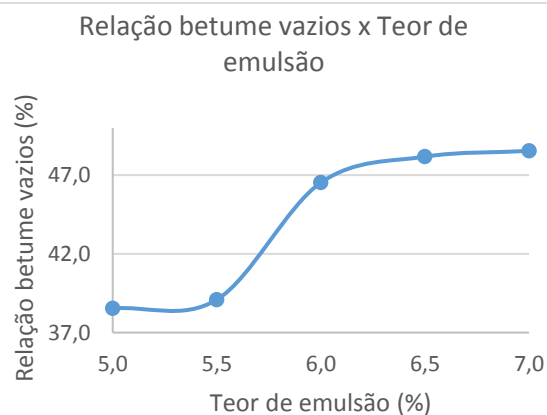
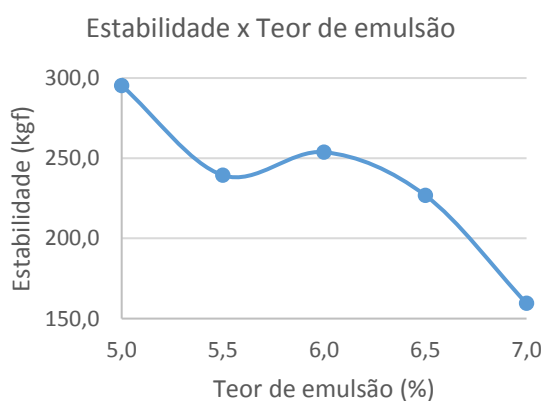
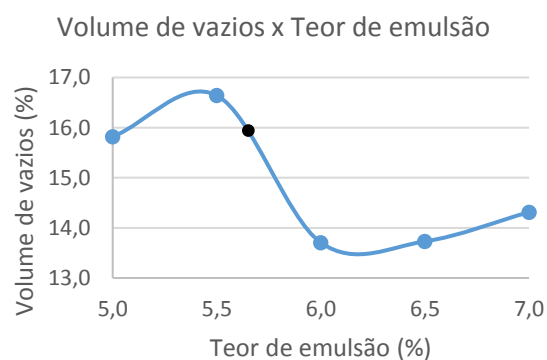
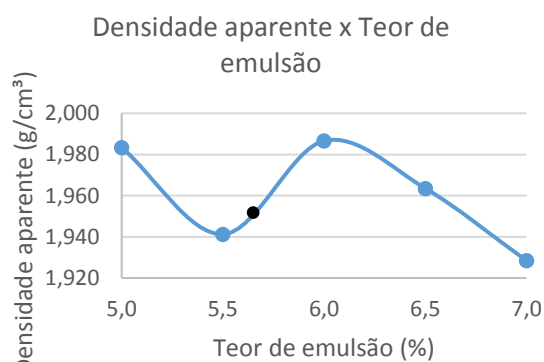
Fracionamento para Dosagem de CPs, em massa (g)											
Peneira	Mistura 1			Mistura 2				Mistura 3			
	Fresado	Brita 1	Pó de Pedra	Fresado	Brita 1	Pó de Pedra	Cal	Fresado	Brita 1	Pó de Pedra	Cal
3/4"	93,8	7,5	0	93,8	7,5	0	0	93,8	7,5	0	0
1/2"	106,5	133,7	0	106,5	133,7	0	0	106,5	133,7	0	0
3/8"	73,9	74,8	0	73,9	74,8	0	0	73,9	74,8	0	0
# 4	189,9	33	0,3	189,9	33	0,3	0	189,9	33	0,2	0
# 10	139	0	12,1	139	0	9,6	0	139	0	7,2	0
# 200	91,8	0,2	33,1	91,8	0,2	26,5	0,5	91,8	0,2	19,9	1
Fundo	5,1	0,8	4,5	5,1	0,8	3,6	9,5	5,1	0,8	2,7	19
Total	700	250	50	700	250	40	10	700	250	30	20

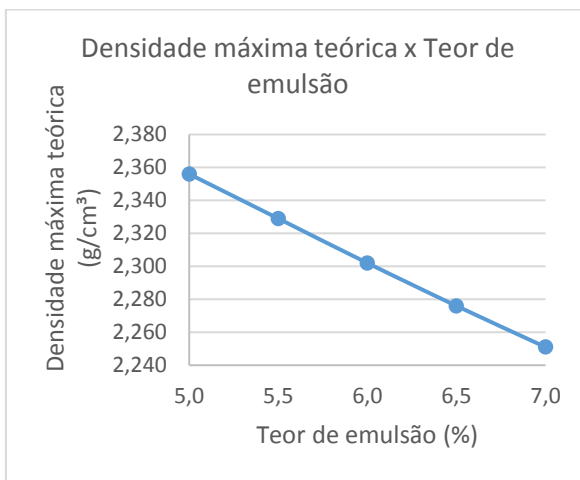
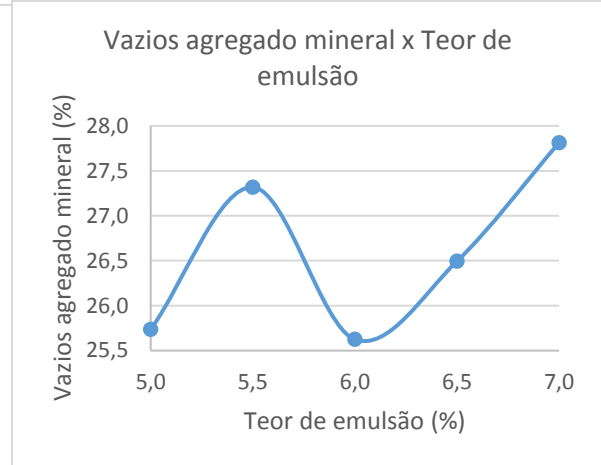
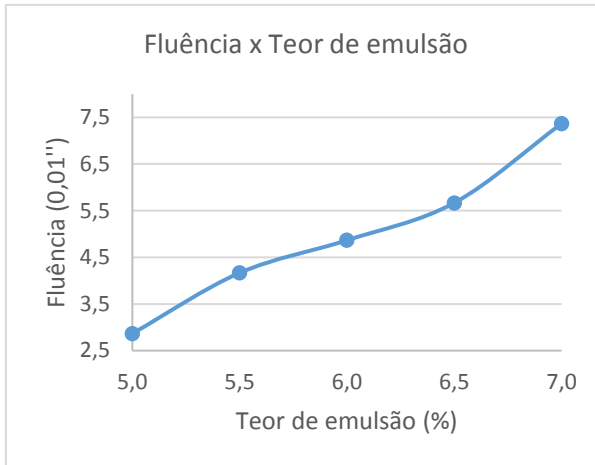
TEOR PRELIMINAR

Mistura 1	Mistura 2	Mistura 3
$100\Sigma = 0,14P_3 + 0,33P_2 + 0,81P_1 + 21,9S_1 + 135F$		
$P_3 = (200,3 + 7,5 + 133,7) \times 0,14$ $P_3 = 47,81$ $P_2 =$ $(73,9 + 189,9 + 74,8 + 33,3) \times 0,33$ $P_2 = 122,73$ $P_1 = (139,3 + 12,1) \times 0,81$ $P_1 = 122,63$ $S_1 = (91,8 + 0,2 + 33,1) \times 21,9$ $S_1 = 2739,69$ $F = (5,1 + 0,8 + 4,5) \times 135$ $F = 1404$ $100\Sigma =$ $47,81 + 122,73 + 122,63 + 2739,69 + 1404$ $100\Sigma = 4436,76$ $\Sigma = 44,37 / 10$ $\Sigma = 4,437 (m^2/kg)$	$P_3 = (200,3 + 7,5 + 133,7) \times 0,14$ $P_3 = 47,81$ $P_2 =$ $(73,9 + 189,9 + 74,8 + 33 + 0,3) \times 0,33$ $P_2 = 122,73$ $P_1 = (139 + 9,6) \times 0,81$ $P_1 = 120,37$ $S_1 = (91,8 + 0,2 + 26,5 + 0,5) \times 21,9$ $S_1 = 2606,1$ $F = (5,1 + 0,8 + 3,6 + 9,5) \times 135$ $F = 2565$ $100\Sigma =$ $47,81 + 122,73 + 120,37 + 2606,1 + 2565$ $100\Sigma = 5462,01$ $\Sigma = 54,62 / 10$ $\Sigma = 5,462 (m^2/kg)$	$P_3 = (200,3 + 7,5 + 133,7) \times 0,14$ $P_3 = 47,81$ $P_2 =$ $(73,9 + 189,9 + 74,8 + 33 + 0,2) \times 0,33$ $P_2 = 122,73$ $P_1 = (139,3 + 7,2) \times 0,81$ $P_1 = 118,75$ $S_1 = (91,8 + 0,2 + 19,9 + 1) \times 21,9$ $S_1 = 2472,51$ $F = (5,1 + 0,8 + 2,7 + 19) \times 135$ $F = 3726$ $100\Sigma =$ $47,81 + 122,73 + 118,66 + 2472,51 + 3726$ $100\Sigma = 6487,68$ $\Sigma = 64,87 / 10$ $\Sigma = 6,487 (m^2/kg)$
$p = K \times \Sigma \times 0,2 \times Z$		
$p = 4,0 \times 4,437 \times 0,2 \times 1,01$ $p = 3,585\%$	$p = 4,0 \times 5,462 \times 0,2 \times 1,01$ $p = 4,413\%$	$p = 4,0 \times 6,487 \times 0,2 \times 1,01$ $p = 5,242\%$
$p' = (100 \times p) / (100 + p)$		
$p' = (100 \times 3,585) / (100 + 3,585)$ $p' = 3,461\%$	$p' = (100 \times 4,413) / (100 + 4,413)$ $p' = 4,226\%$	$p' = (100 \times 5,242) / (100 + 5,242)$ $p' = 4,981\%$
$p'ea = 100 \times p' / t$		
$p'ea = 100 \times 3,461 / 62,8$ $p'ea = 5,51\%$	$p'ea = 100 \times 4,226 / 62,8$ $p'ea = 6,73\%$	$p'ea = 100 \times 4,981 / 62,8$ $p'ea = 7,93\%$

CARACTERÍSTICAS DOS CPs MOLDADOS – MISTURA 1

Mistura 1	Teores de Ligante				
Propriedades	5,00%	5,50%	6,00%	6,50%	7,00%
Densidade (g/cm ³)	1,983	1,941	1,987	1,964	1,928
Densidade máxima teórica (g/cm ³)	2,356	2,329	2,302	2,276	2,251
Vazios do Agregado Mineral	25,74%	27,32%	25,62%	26,49%	27,81%
Volume de Vazios	15,82%	16,64%	13,71%	13,73%	14,31%
Relação Betume/Vazios	38,54%	39,09%	46,53%	48,17%	48,54%
Estabilidade (kgf)	295	239	254	227	159
Fluência (mm)	2,9	4,2	4,9	5,7	7,4

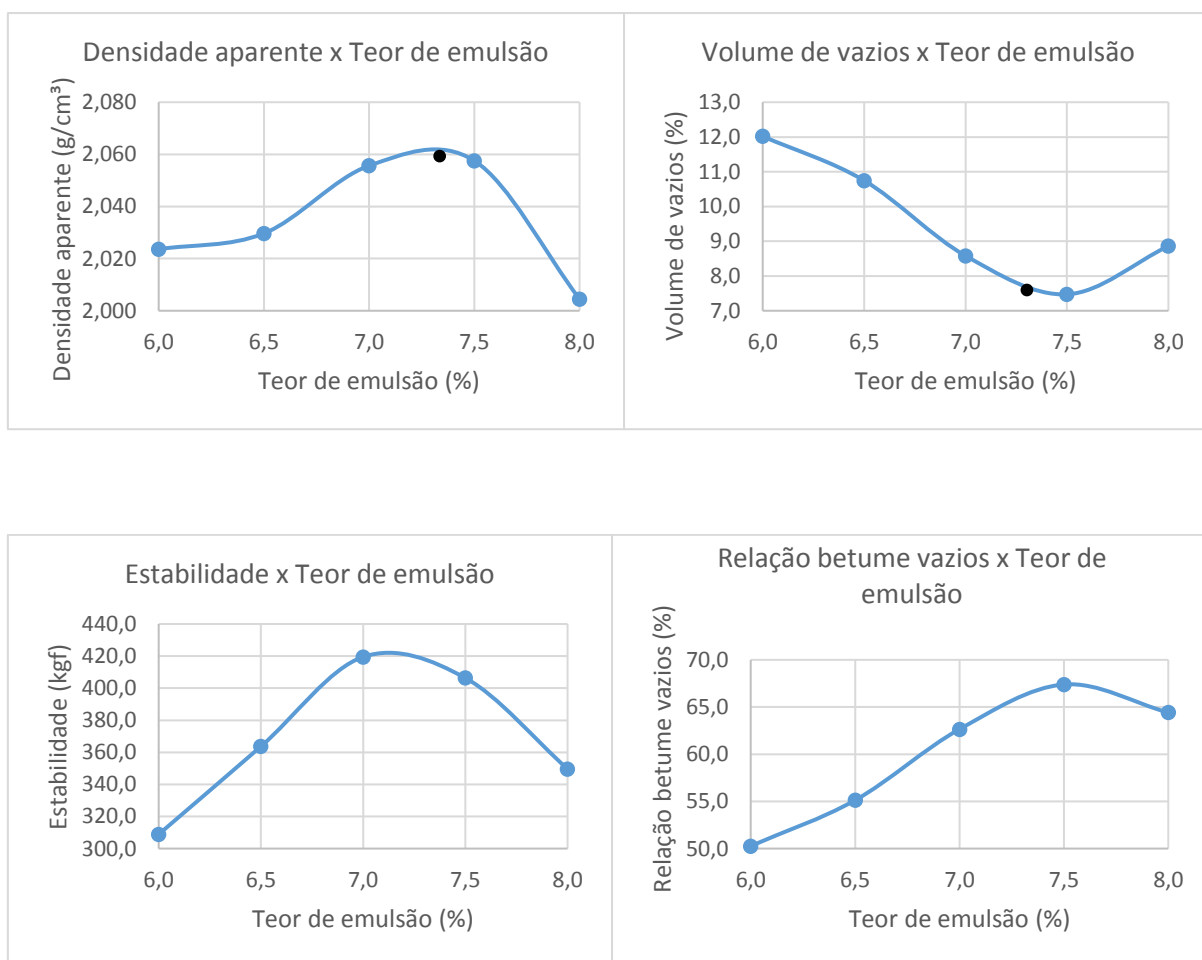


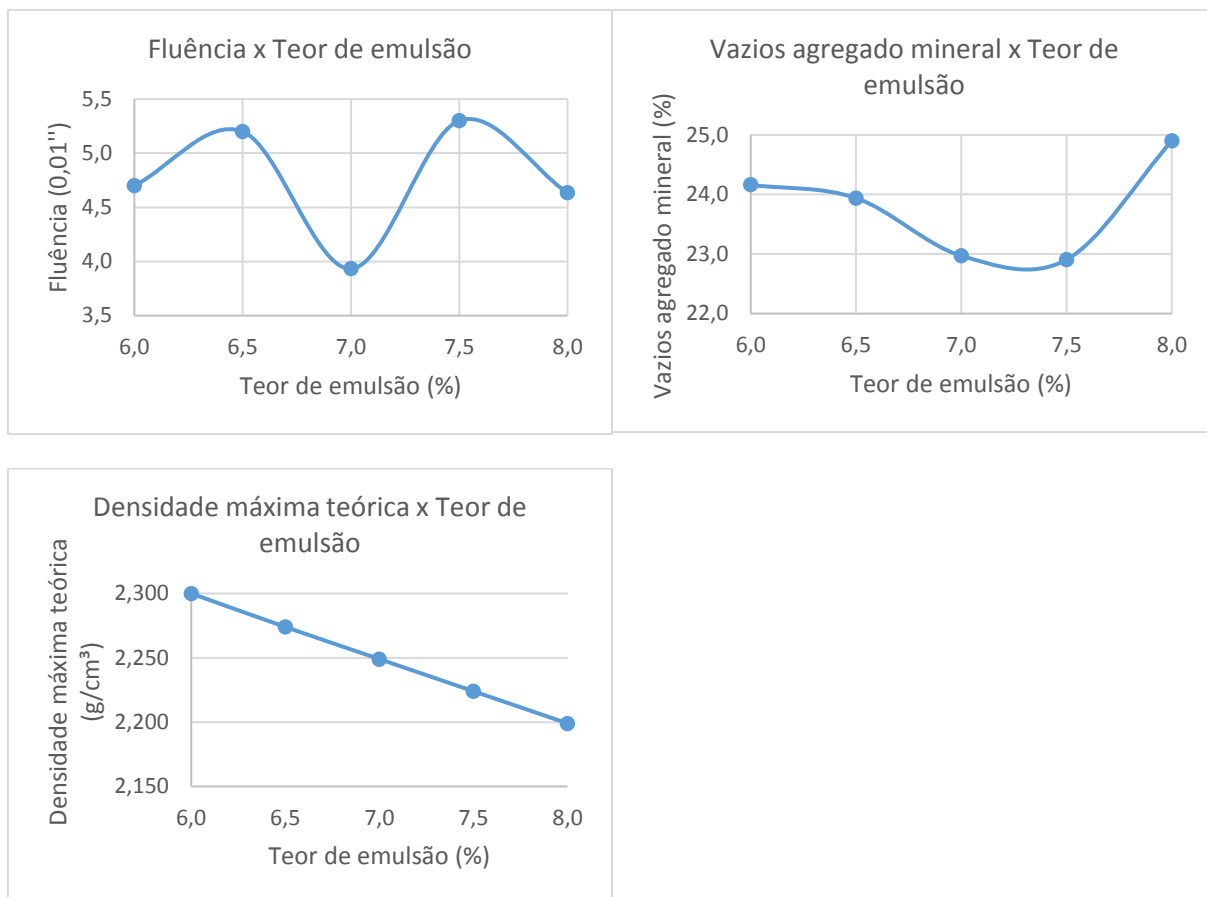


Mistura 1	Sem cal
Teor de projeto	5,70%
Densidade aparente	1,983 g/cm³
Volume de vazios	14,44%
Estabilidade	295 kgf

CARACTERÍSTICAS DOS CPs MOLDADOS – MISTURA 2

Mistura 2	Teores de Ligante				
Propriedades	6,00%	6,50%	7,00%	7,50%	8,00%
Densidade (g/cm ³)	2,024	2,03	2,056	2,058	2,004
Densidade máxima teórica (g/cm ³)	2,3	2,274	2,249	2,224	2,199
Vazios do Agregado Mineral	24,16%	23,94%	22,97%	22,91%	24,90%
Volume de Vazios	12,02%	10,75%	8,58%	7,47%	8,86%
Relação Betume/Vazios	50,27%	55,12%	62,65%	67,39%	64,42%
Estabilidade (kgf)	309	364	419	406	350
Fluência (mm)	4,7	5,2	3,9	5,3	4,6

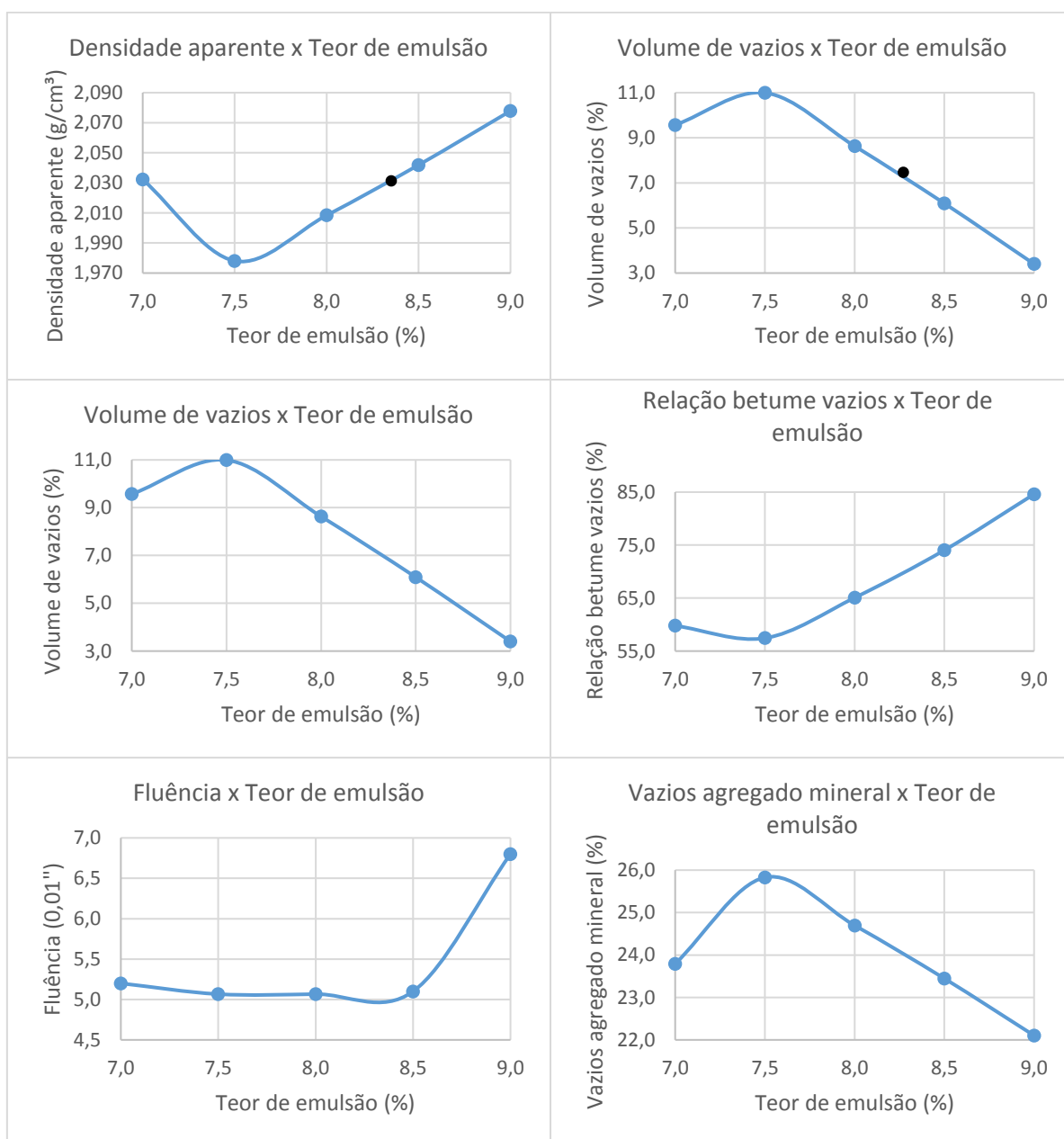


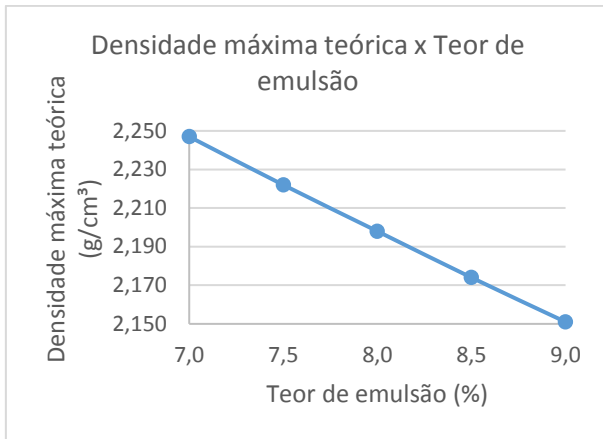


Mistura 2	1 % cal
Teor de projeto	7,33%
Densidade aparente	2,007 g/cm³
Volume de vazios	10,05%
Estabilidade	419 kgf

CARACTERÍSTICAS DOS CPs MOLDADOS – MISTURA 3

Mistura 3	Teores de Ligante				
Propriedades	7,00%	7,50%	8,00%	8,50%	9,00%
Densidade (g/cm ³)	2,032	1,978	2,008	2,042	2,078
Densidade máxima teórica (g/cm ³)	2,247	2,222	2,198	2,174	2,151
Vazios do Agregado Mineral	23,79%	25,83%	24,70%	23,45%	22,10%
Volume de Vazios	9,57%	10,99%	8,63%	6,09%	3,40%
Relação Betume/Vazios	59,79%	57,45%	65,06%	74,03%	84,61%
Estabilidade (kgf)	359	282	289	341	325
Fluência (mm)	5,2	5,1	5,1	5,1	6,8



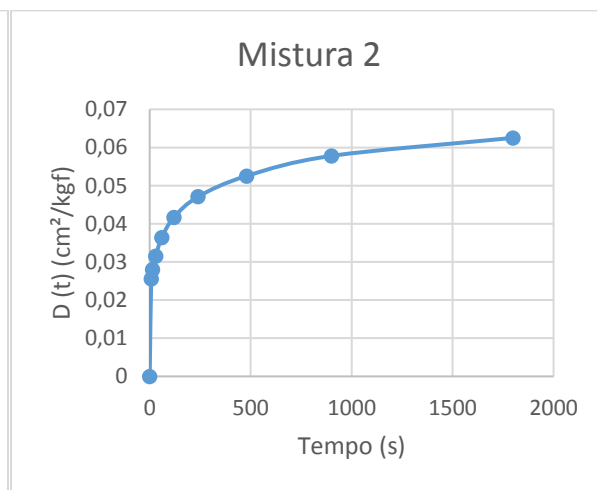
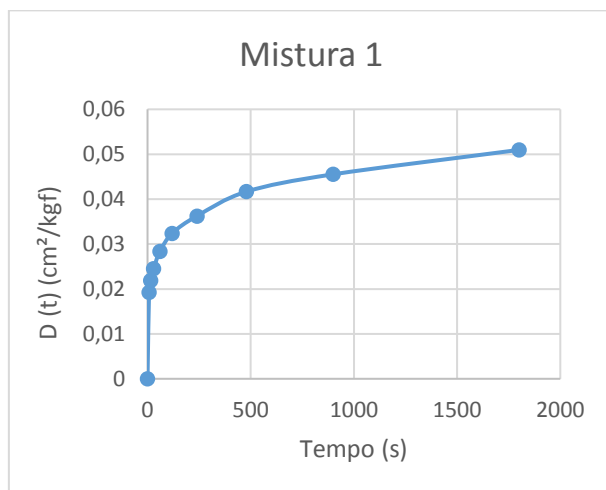


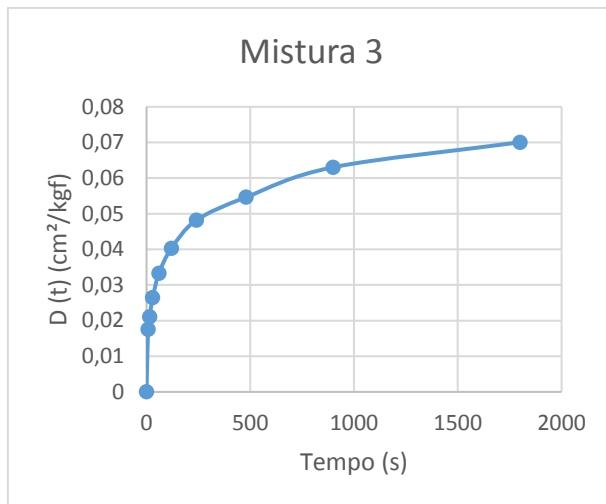
Mistura 3	2 % cal
Teor de projeto	8,30%
Densidade aparente	2,024 g/cm³
Volume de vazios	7,32%
Estabilidade	419 kgf

APÊNDICE B – Relatório de ensaio de deformação permanente

Temperatura 25°C

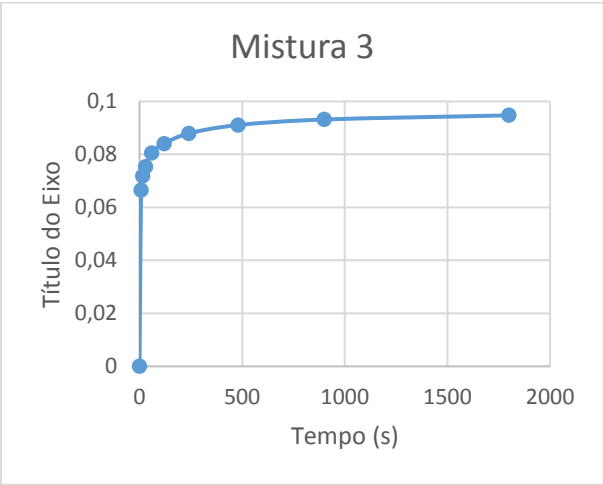
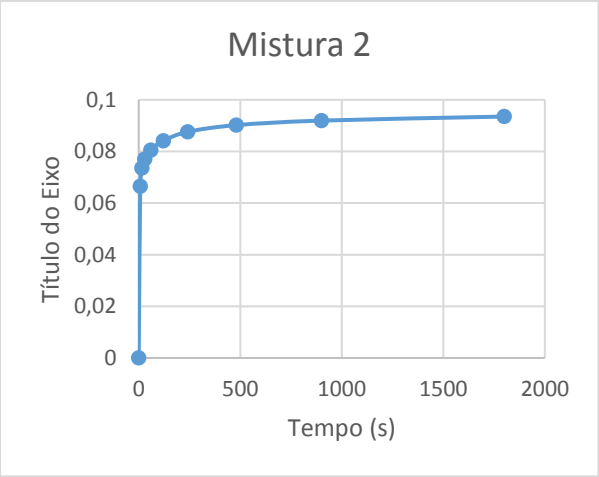
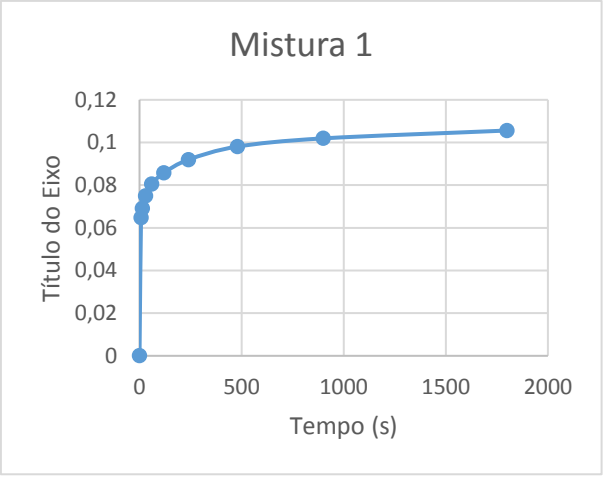
	Mistura 1	Mistura 2	Mistura 3
Tempo (s)	D(t) (cm ² /kgf)	D(t) (cm ² /kgf)	D(t) (cm ² /kgf)
0	0,0000	0,0000	0,0000
7,5	0,0193	0,0256	0,0175
15	0,0219	0,0280	0,0210
30	0,0245	0,0315	0,0264
60	0,0284	0,0364	0,0333
120	0,0324	0,0417	0,0403
240	0,0363	0,0471	0,0482
480	0,0417	0,0525	0,0546
900	0,0455	0,0578	0,0630
1800	0,0510	0,0625	0,0701





Temperatura 40°C

	Mistura 1	Mistura 2	Mistura 3
Tempo (s)	D(t) (cm²/kgf)	D(t) (cm²/kgf)	D(t) (cm²/kgf)
0	0,0000	0,0000	0,0000
7,5	0,0648	0,0665	0,0665
15	0,0692	0,0736	0,0718
30	0,0750	0,0771	0,0753
60	0,0806	0,0806	0,0806
120	0,0858	0,0841	0,0841
240	0,0919	0,0876	0,0879
480	0,0981	0,0902	0,0911
900	0,1019	0,0919	0,0932
1800	0,1056	0,0935	0,0947





UNIVATES

R. Avelino Tallini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil
CEP 95900.000 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000
www.univates.br | 0800 7 07 08 09